

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

# **Vliv asistenčních plynů na vlastnosti laserem přetavené vrstvy**

Working Gas Influence After Laser  
Surface Remelting

Student:

Bc. Marek Baran

Osobní číslo:

BAR0553

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2020

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Baran**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Vliv asistenčních plynů na vlastnosti laserem přetavené vrstvy**  
**Working Gas Influence After Laser Surface Remelting**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii používaných základních materiálů.
2. Proved'te charakteristiku používaného zařízení a technologie.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program se zaměřením na vliv asistenčních plynů na užité vlastnosti přetavených vrstev.
4. Proved'te diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.  
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.  
YILBAS, B.; SHUJA, S. *Laser surface processing and model studies*. Berlin: Springer, 2013  
TEMMLER, A.; WILLENBORG, E.; WISSENBAACH, K. Design surfaces by laser remelting. *Physics Procedia*, 2011, 12: 419-430.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce, s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Jméno, příjmení**

Marek Baran

**Adresa**

Český Těšín, Klidná 148, 735 62

**Dne 18.5.2020**

**Podpis** .....

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně a s použitím uvedených zdrojů.

Dne 18.5.2020



.....

Bc. Marek Baran

### **Poděkování:**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této diplomové práce Ing. Vladislavu Ochodkovi za jeho přístup, odborné vedení a vstřícnost projevenou při psaní této práce i během studia, konzultantovi diplomové práce Ing. Martinu Greplovi Ph.D. za jeho ochotu sdílet své zkušenosti a Ing. Tereze Schneiderové za pomoc při metalografické zkoušce.

## ANOTACE

BARAN, Marek. *Vliv asistenčních plynů na vlastnosti laserem přetavené vrstvy: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 73 s. Vedoucí práce: Ing. Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá problematikou technologie vrtání laserovým paprskem v oblasti výroby chladících otvorů spalovacích komor v leteckém průmyslu. Je proveden popis vláknových laserů a vybraných strojírenských technologií, které využívají laserový paprsek. V experimentální části je zkoumán vliv různých asistenčních plynů (kyslíku a dusíku), jejich tlaku a úhlu vrtání na přetavenou vrstvu v otvoru vrtaného do materiálu Haynes 230. Pomocí metalografické zkoušky byla měřena tloušťka přetavené vrstvy a délka a počet mikrotrhlin v základním materiálu.

Klíčová slova: laserové technologie, vláknový laser, laserové vrtání, přetavená vrstva, Haynes 230

## ANNOTATION OF THESIS

BARAN, Marek. *Working Gas Influence After Laser Surface Remelting: Master Thesis*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2020, 75 p. Thesis Head: Ing. Ochodek, V.

The master thesis deals with laser cutting technology of combustion chambers effusion cooling holes used in aerospace industry. Fiber lasers and selected laser-based technologies were described. The experiment investigated the influence of different working gases (oxygen, nitrogen), working gas pressure and drilling angle on recast layer of holes drilled in Haynes 230 metal sheet. Using metallographic analysis, thickness of recast layer, length and quantity of microcracks were examined.

Key words: laser technology, fiber laser, laser drilling, surface remelting, Haynes 230

# Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	9
ÚVOD.....	10
1. Laserová zařízení .....	11
1.1 Klasifikace laserových zařízení.....	11
1.2 Vláknové lasery .....	12
1.3 Fyzikální princip čerpání vláknových laserů.....	15
1.4 Výhody vláknových laserů.....	17
2. Technologie využívající laserový paprsek .....	18
2.1 Soustružení laserovým paprskem .....	19
2.2 Navařování laserovým paprskem .....	20
2.3 3D tisk laserovým paprskem .....	20
2.4 Vrtání laserovým paprskem .....	21
2.4.1 Metody vrtání laserovým paprskem .....	23
2.4.2 Asistenční plyny .....	24
2.4.3 Aplikace vrtání laserem .....	27
2.4.4 Klady a zápory vrtání laserovým paprskem .....	28
3. Průvodní informace k experimentu .....	30
3.1 Zkušební materiál .....	31
3.2 Použitá zařízení .....	33
3.3 Zkušební vzorky .....	34
4. Experimentální část .....	37
4.1 Naměřené hodnoty přetavené vrstvy a mikrotrhlin.....	40
4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot.....	43
5. Diskuze výsledků.....	51
6. Závěr.....	56
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	58

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	63
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ .....	64
PŘÍLOHA A – DALŠÍ SNÍMKY Z METALOGRAFICKÉ ZKOUŠKY .....	66
PŘÍLOHA B – POROVNÁNÍ VZORKŮ V RÁMCI JEDNOTLIVÝCH SKUPIN .....	69



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Popis
A	(%)	tažnost
avgLmax	(mm)	průměrná délka nejdelší nalezené mikrotrhliny
avgN	-	průměrný počet nalezených mikrotrhlin
avgPV	(mm)	průměrná tloušťka přetavené vrstvy
CAM	-	počítačem podporovaná výroba
LAM	-	obrábění s pomocí laserového paprsku
Lmax	(mm)	nejdelší nalezená mikrotrhlina
M	-	podíl množství chladícího a chlazeného plynu
N	-	počet nalezených mikrotrhlin
PV	(mm)	tloušťka přetavené vrstvy
Ra	( $\mu\text{m}$ )	střední aritmetická úchylka profilu
R <sub>m</sub>	(MPa)	mez pevnosti
R <sub>p0,2</sub>	(MPa)	smluvní mez kluzu
SLS	-	selektivní spékání laserem
WDM	-	vlnový multiplex

# ÚVOD

Laserové technologie jsou pro své unikátní vlastnosti velice četně využívány v nejrůznějších zařízeních, a aniž bychom si to často uvědomovali, v moderním světě s nimi přicházíme do kontaktu snad každodenně. V odvětví strojírenské výroby se v současnosti těší oblibě zejména vláknové lasery, které postupně nahrazují pevnolátkové a plynové typy laserů. Laserová zařízení se používají pro celou řadu výrobních technologií, z nichž některé jsou detailněji popsány v dalších kapitolách této práce.

Teoretická část této diplomové práce obsahově navazuje na bakalářskou práci autora, kde byl popsán fyzikální princip, historie a konstrukce některých typů laserů a význam jejich procesních parametrů s důrazem na technologii řezání laserem [35]. Tato diplomová práce prohlubuje poskytnuté informace o vláknovém laseru a představuje další technologie využívající laserový paprsek.

V experimentální části byla zkoumána problematika přetavené vrstvy při procesu laserového vrtání do slitiny Haynes 230. Cílem práce bylo provést metalografickou analýzu přetavené vrstvy při použití různých druhů a tlaků asistenčních plynů. Přetavená vrstva je velice významná zejména z hlediska vzniku trhlin, které silně ovlivňují únavové charakteristiky dané součásti, což je v prostředí leteckého průmyslu, pro který je tato slitina určena, zásadní kritérium.

# 1. Laserová zařízení

Od prvního sestrojeného laseru z roku 1954 zažily laserové technologie obrovský pokrok. Účel prvního průmyslového laseru v roce 1960 byl docela specifický – vyvrtávání otvorů v diamantech pro průvlaky na tažení drátu. Oproti tomu dnes jsou lasery tak vyspělé, že se s nimi setkáváme takřka každodenně a často by bylo nemožné je nahradit jinými technologiemi. V současnosti je na trhu velký počet různých laserů, avšak potřebám strojírenství obecně vyhovují jen ty, které mají [1]:

- energetický výkon v rozsahu 100 W až desítky kW,
- relativně dostupnou cenu,
- dlouhodobou vysokou spolehlivost.

## 1.1 Klasifikace laserových zařízení

Podle typu aktivního prostředí se lasery dělí na [2]:

- pevnolátkové,
- polovodičové,
- plynové,
- kapalinové,
- plazmové.

Dělení podle časového režimu provozu:

- kontinuální,
- kvazikontinuální,
- pulsní.

Dělení podle délky generovaného impulsu:

- s dlouhými pulsy,
- s krátkými pulsy,
- s velmi krátkými pulsy (femtosekundové, pikosekundové).

Dělení podle způsobu buzení:

- opticky,
- elektrickým výbojem či svazkem,
- tepelnými změnami,
- rekombinací,
- injekcí nosičů náboje.

Dělení podle vlnové délky vysílaného záření:

- infračervené,
- ultrafialové,
- rentgenové,
- lasery viditelného pásma.

Metod dělení existuje ještě více, ale pro potřeby této práce není nutné je uvádět. Vzhledem k uchování návaznosti na bakalářskou práci autora a dodržení doporučeného počtu stran se práce nadále bude soustředit převážně na skupinu vláknových laserů, neboť právě tento typ je použit v experimentální části [35].

## **1.2 Vláknové lasery**

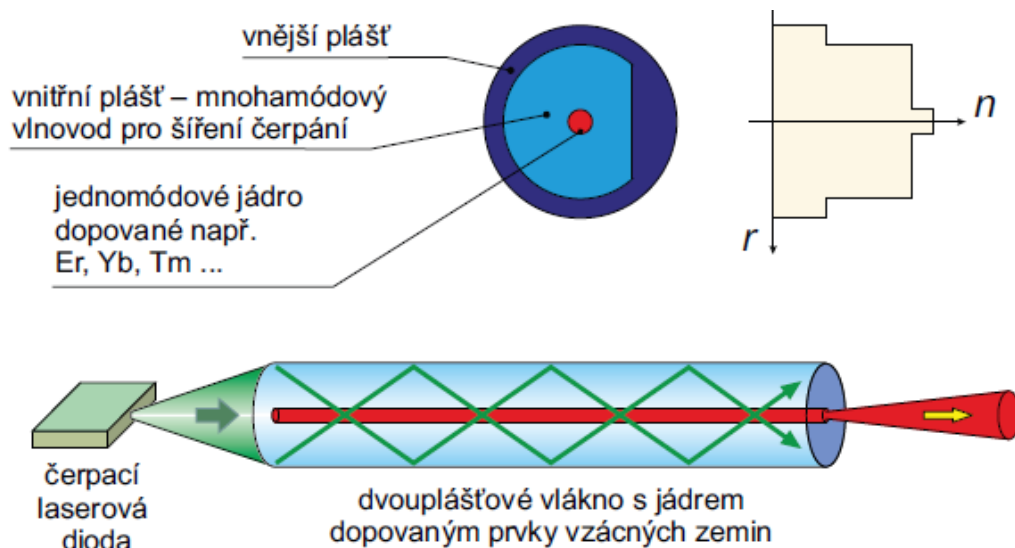
O vláknovém laseru se často hovoří jako o „novém, moderním typu“ laseru. Ve skutečnosti byl ale sestaven už v roce 1960, tedy nedlouho poté, co Theodore Maiman vynalezl vůbec první funkční laser na světě. Maimanův laser jako aktivní prostředí používal krystal rubínu. Oproti tomu Elias Snitzer, vynálezce vláknového laseru, použil jako aktivní prostředí skleněné vlákno s jádrem dotovaným (=„legovaným“) neodymem. Tento vláknový laser byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno spirálovitě obtočené. Snitzerův vynález však byl vnímán spíše jako laboratorní kuriozita a zdálo se, že hlavní cestou vývoje laserových technologií budou jiné druhy pevnolátkových laserů, které zaznamenávaly rychlý pokrok [3].

V 80. letech se však zájem o vláknový laser obnovil. Za tu dobu totiž optická vlákna kvůli svému využití v oblasti telekomunikace zažila velký rozvoj a D. N. Payn vynalezl erbiem dotovaný vláknový zesilovač, což je mimochodem zařízení, které umožnilo výstavbu

dálkových vysokokapacitních spojů a přispělo k rozvoji internetu. Pro vláknové lasery ale bylo důležitější, že tato komponenta otevřela nové možnosti pro transparentní optické sítě s vlnovým multiplexem, označováno jako WDM (technologie vlnového multiplexu kombinuje více optických signálů o různých vlnových délkách do jednoho a dovoluje jejich vysílání v jednom optickém vlákně). Dalším impulzem pro vývoj vláknových laserů byl silný propad telekomunikačních akcií v roce 2001, načež výrobci optických vláken hledali nová využití svých produktů [3].

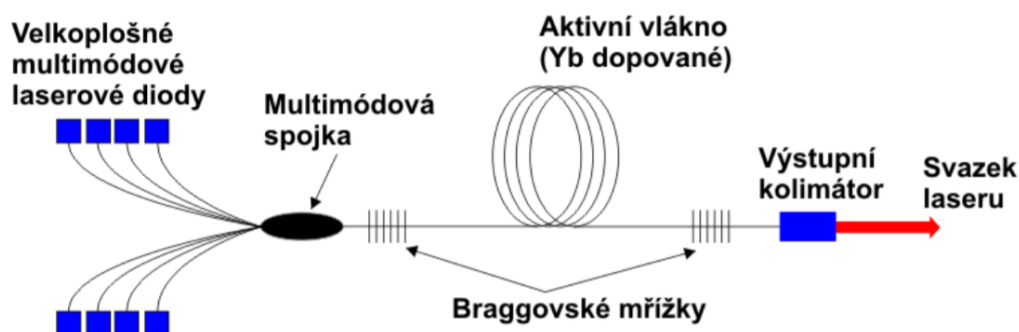
Aktivní prostředí vláknových laserů je tvořeno optickým vláknem s křemíkovým jádrem dotovaným prvky vzácných zemin – nejčastěji erbiem, ytterbiem, thuliem či praseodymem [4]. Ty se ve formě malých částic přimísí do jádra během jeho výroby [5]. Vláknem je velmi štíhlé – jeho průměr bývá jen pár mikrometrů a délka i několik metrů [6]. Funkci rezonátoru obvykle zastávají tzv. braggovské mřížky, což jsou periodické struktury odrážející jen světlo s určitou vlnovou délkou a ostatní světlo je propuštěno [4]. Jsou umístěny na obou koncích optického vlákna [6]. Vyrábí se ozářením optického jádra externím vysoko výkonovým laserem přes mikroskopickou mřížku vyleptanou v křemenné podložce. Tímto ozářením se v určité periodě přeruší některé molekulární vazby v křemenném skle optického jádra a vytvoří se periodická modulace indexu lomu. Tato mřížka pak bude odrážet pouze světlo o takové vlnové délce, která je v resonanci s periodou vytvořené mřížky [3].

Vláknové lasery dosahují velkých výkonů, protože jejich aktivní prostředí je možné budit přes plášť optického vlákna, tedy na relativně velké ploše. Schéma optického vlákna je uvedeno na obr. 1.1. K čerpání je možno použít několik laserových diod. Fyzikálním limitem výstupního výkonu z jednoho vláknového systému se odhaduje mezi 10 až 20 kW. Hlavními omezujícími faktory jsou ztrátové teplo a nelineární fyzikální jevy (stimulovaný Brillouinův a Ramanův rozptyl). Takový výkon je pro většinu průmyslových aplikací více než dostatečný, ale pro jiné, extrémní aplikace nemusí stačit (např. armádní systémy). Vyššího výkonu je pak možné dosáhnout kombinováním výstupů z několika vláknových laserů [3].



Obrázek 1.1 – Schéma optického vlákna [3]

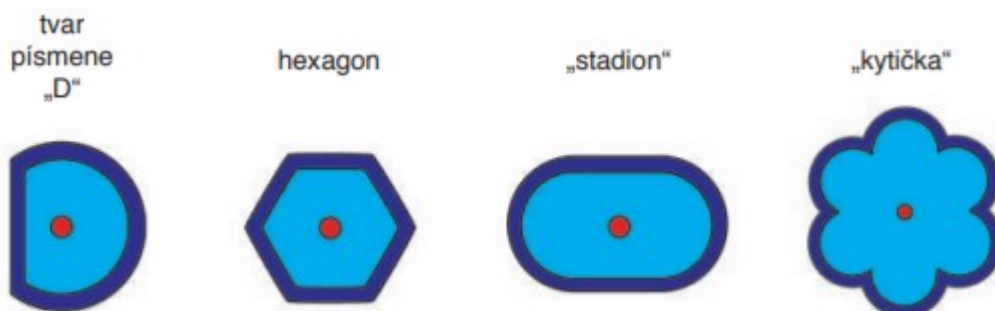
Jádro dotované prvky vzácných zemin zesiluje laserové záření a má vyšší index lomu než jeho vnitřní plášť, takže slouží jako vlnovod záření. Vnitřní plášť je obalen vnějším pláštěm z materiálu, který má ještě nižší index lomu, např. z akrylátu. Do vnitřního pláště je přiváděno budící záření z diod, které je pak opakovaně absorbováno ionty vzácných zemin. Ty následně excitují a nastává stimulovaná emise. Tímto se vysoce rozbíhavý svazek z budících diod transformuje do kvalitního, jednomódového laserového svazku [3]. O vytvoření laserového paprsku s definovanou geometrií se pak stará výstupní optická soustava umístěná na konci vlákna. Schéma vláknového laseru zachycuje obr. 1.2 [7].



Obrázek 1.2 – Schéma vláknového laseru [7]

Jak je vidět na obrázku 1.1, průřez vnitřního pláště není kruhový, ale připomíná tvar písmene „D“. Další vhodné tvary jsou schematicky znázorněny na obr. 1.3 [8]. Kruhový průřez by totiž způsobil nehomogenitu absorpce. Paprsky šířící se středem vlákna by byly absorbovány, zatímco mimoosové paprsky by jádro míjely. Z tohoto důvodu se používá tento specifický tvar průřezu, který zajistí tzv. chaotickou dynamiku šíření paprsků.

To způsobí, že po určité délce vlákna bude rozložení intenzity záření bez ohledu na způsob buzení statisticky rovnoměrné [3].



Obrázek 1.3 – Příklad průřezů vláken vhodných pro čerpání přes plášť [8]

### 1.3 Fyzikální princip čerpání vláknových laserů

Vláknové lasery bývají čerpány laserovými diodami, kterým se také říká diodové nebo polovodičové lasery. Ty jsou obecně velice univerzální – mohou sloužit právě jako „srdce“ vláknových (a jiných) laserů, ale i jako jejich přímý konkurent např. při laserovém svařování. Velmi velký význam mají ve výpočetní technice [5].

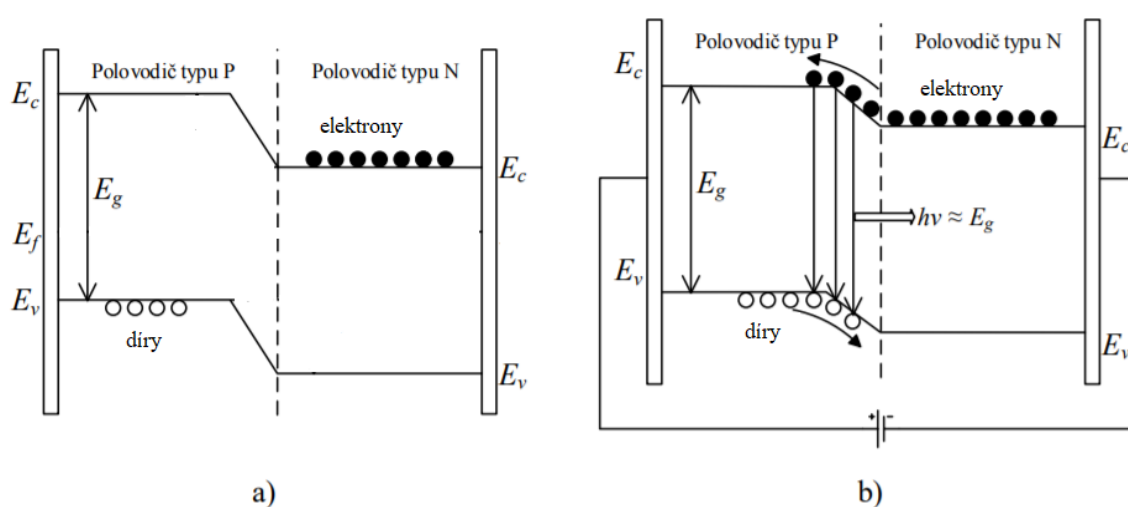
Základem laserové diody je krystal obsahující PN přechod. Krystal je vybroušen tak, aby jeho čelní stěna byla na PN přechod kolmá. Princip laserové diody je stejně jako u všech ostatních laserů založen na stimulované emisi, ale na rozdíl od jiných typů laserů neprobíhají zářivé přechody mezi energetickými hladinami, nýbrž mezi energetickými pásy. Aktivní prostředí v tomto případě tvořeno právě PN přechodem, na kterém dochází k injekci elektronů a děr. Buzení je prováděno elektrickým polem a funkci rezonátoru zde plní vybroušené stěny krystalu [2].

K porozumění následujících řádků je vhodná znalost některých poznatků z teorie polovodičů [2]:

- Nejnižší energetický zaplněný pás se nazývá *valenční* ( $E_v$ ).
- Nejbližší vyšší pás dovolených energií se nazývá *vodivostní* ( $E_c$ ). U pevných látek bývá zcela nebo částečně prázdný.
- Polovodič je látka, která se vlivem teplotní excitace stává vodivou, protože energetický pás mezi valenčním a vodivostním pásem je dostatečně malý na to, aby elektrony mohly přeskočit z valenčního pásu do vodivostního.

- Když excitovaný elektron přejde do vodivostního pásu, ve valenčním pásu po něm zbyde *díra*, což je stav s totožnými vlastnostmi jako elektron, ale opačným nábojem.

Vlivem elektrického pole jsou elektrony ve vodivostním pásu polovodiče N injektovány do polovodiče typu P a naopak díry z valenčního pásu polovodiče typu P přechází do polovodiče typu N (viz. obr. 1.4). Při následné rekombinaci párů elektronů a děr mezi vodivostní a valenční vrstvou následně dochází k emisi energie ( $h\nu$ ) ve formě fotonu o náhodné fázi a polarizaci (=spontánní emise). Velikost této energie je dána šířkou tzv. *zakázaného pásu* ( $E_g$ ) [2].



Obrázek 1.4 – Energetický diagram PN přechodu v: a) nezatíženém stavu b) po připojení napětí [9]

Stimulovaná emise by nastala, pokud by foton o vhodné energii stimuloval elektron, který už je ve vodivostním pásu, ale ještě nestihl rekombinovat. Došlo by pak k návratu elektronu do valenčního pásu, a přitom by vyzářil další foton o stejném směru, polarizaci i fázi, jako měl foton stimulující. Ke změně mechanismu emise na stimulovanou je nutné dosáhnout tzv. prahové hustoty budícího proudu, což znamená, že stačí zvýšit proud tak, aby se dostatečně zrychlil proces rekombinace elektronů a děr. Vyzářené fotony se pak odráží od stěny rezonátoru, opakovaně prochází oblastí přechodu a vzniká laserové záření [2].



## 1.4 Výhody vláknových laserů

Výhody vláknového laseru oproti ostatním laserům jsou [4, 10]:

- jednoduchost – odpadá problém s údržbou složité optické soustavy zrcadel,
- vysoký výkon – umožněno spojováním laserových modulů,
- vysoká účinnost,
- dlouhá životnost,
- vysoká kvalita laserového svazku,
- nízké provozní náklady,
- nepotřebuje speciální chlazení jako např. slab lasery – k ochlazení dlouhého vlákna stačí okolní vzduch.

Konkrétní hodnoty vybraných parametrů shrnuje tabulka 1.1, která je dává do kontrastu s jinými často používanými typy laserů. Z tabulky vyplývá, že vláknový laser je v současnosti pro účely strojírenství nejvýhodnějším typem laseru [10].

*Tabulka 1.1 – Základní přehled vybraných parametrů průmyslových laserů [10]*

Laser	Buzení	Účinnost	Režim	Výkon / Energie	Údržba	Život. (h)
Nd:YAG	laser. diody	~7%	kontinuální	až 6kW	ano	~10 000
	lampy	~3%	pulsní	~ mJ/ns (~100W)		~1000
CO <sub>2</sub>	radiofrekvenčně	~10%	kontinuální / pulsní	~ J/ms (~600W)	ano	~20 000
	elektricky	~25%		10-250W až 5kW (slab) až 20kW (průtočné)		--
Diskový	laser. diody	~15%	kontinuální	až 16 kW	ano	~10 000
Vláknový	laser. diody	~30%	kontinuální	až 80 kW	ne	~100 000
			kvazikontinuální	~ J/ms (~1,2kW)		
Diodový	elektricky	~60%	pulsní	~ mJ/ns (~100W)	ne	~15 000
			kontinuální	až 10kW	ne	~15 000

## 2. Technologie využívající laserový paprsek

Laserový paprsek je pro své unikátní vlastnosti hojně využíván v různých odvětvích – v lékařství, kosmetice, astronomii, stavebnictví a v mnoha dalších. Ve strojírenském odvětví se používá pro celou řadu technologických operací [11]:

- soustružení,
- frézování,
- řezání,
- popisování a gravírování,
- svařování,
- měření,
- metody „rapid prototyping“ (rychlé prototypování),
- tepelné zpracování,
- vrtání a další.

Jak je vidět, zastoupení laseru je veliké, a navíc se jednotlivé technologie stále vyvíjí a zdokonalují. Zastoupení jednotlivých technologií zachycuje obr. 2.1. Některé z těchto technologií již byly popsány v bakalářské práci a další jsou podrobněji rozebrány v následujících podkapitolách [35].

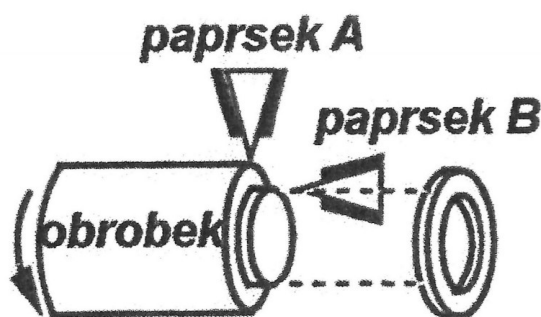


Obrázek 2.1 – Procentuální zastoupení jednotlivých laserových technologií ve strojírenství [12]

## 2.1 Soustružení laserovým paprskem

Principem soustružení laserem je rozdělení laserového paprsku z jednoho zdroje na dva různě nasměrované paprsky, které společně dopadají na obrobek. Úhel mezi paprsky závisí na požadovaném tvaru obráběné plochy. Při obyčejném soustružení průměru válcové plochy

je jeden paprsek orientován na čelo obrobku ve směru osy obrobku a druhý směřuje na válcovou plochu, kolmo k ose obrobku. Laserové paprsky roztavují a odpařují materiál a asistenční plyn odvádí taveninu z místa řezu, až se paprsky nakonec protnou a vzniká odpad (nebo výrobek) ve tvaru mezikruží (viz obr. 2.2) [13].



Obrázek 2.2 – Schéma soustružení laserem [11]

Výhodou soustružení svazkem fotonů je, že odpadají problémy s vibracemi, opotřebením soustružnického nože a tuhostí stroje. Fakt, že se jedná o bezdotykovou metodu také ulehčuje navrhování upínacích přípravků, protože se neřeší řezné síly. Největší výhodou tohoto způsobu soustružení je schopnost jednoduše a přesně obrábět i těžkoobrobitelné materiály (kalená ocel, keramika a jiné). Nevýhodou pak je malý úběr materiálu oproti konvenčním metodám [13].

Další variantou je, že laserový paprsek slouží pouze jako pomocník při klasickém obrábění soustružnickým nožem či frézou, tzv. LAM, což je anglický akronym pro výraz Laser Assisted Machining (obrábění s pomocí laseru). Účelem paprsku je lokálně nahřívat obrobek v místě před břitem nástroje, což má za důsledek zlepšení obrobitelnosti. Ohřev na 800 až 1000 °C způsobí změknutí sklovité fáze mezi jednotlivými trny. Tím klesá tvrdost a pevnost obrobku, a proto nemusí být použita procesní kapalina. Plochy obrobené touto metodou se vyznačují velmi nízkou drsností ( $R_a$  do 0,3  $\mu\text{m}$ ). Tato metoda až čtyřnásobně zvyšuje rychlost obrábění a je obzvláště výhodná pro obrábění keramiky [11].

## 2.2 Navařování laserovým paprskem

Navařování je proces, při kterém se na základní materiál nanáší tenké vrstvy se speciálními vlastnostmi, a tím se zvyšují užité vlastnosti součástí. Výhodou metody navařování laserem je, že dokáže produkovat návary v relativně širokém rozsahu tloušťek – od setin až po jednotky milimetru. Mezi další výhody metody navařování laserem patří [1]:

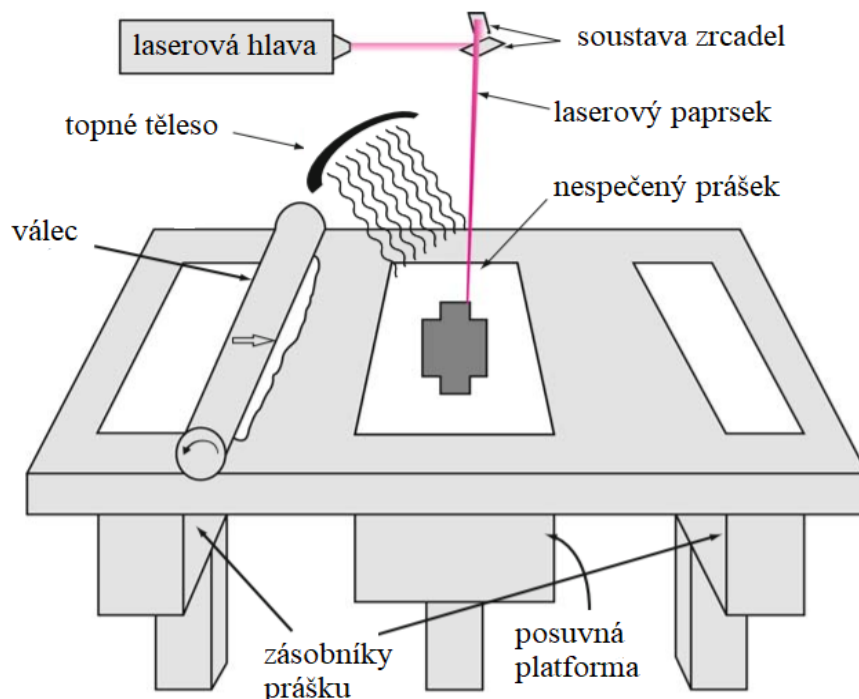
- minimální tepelné ovlivnění základního materiálu (jen pár desetin milimetru),
- vysoká rovnoměrnost a hladkost navařeného povrchu,
- extrémně strmý teplotní cyklus,
- téměř nedochází k promíšení návarového materiálu se základním, což znamená vysokou využitelnost.

Návarový materiál je možné do místa návaru dodávat před započítím navařování ale i během něj. Lze využít všechny běžně používané formy přídavného materiálu – prášek, plný i trubičkový drát a také pásku [1].

## 2.3 3D tisk laserovým paprskem

Jednou z metod progresivní aditivní výroby je tzv. SLS metoda, což je zkratka pro anglický výraz „selective laser sintering“ (v překladu selektivní spékání laserem). Tato metoda je založena na principu lokálního spékání práškového materiálu pomocí laserového paprsku (viz obr. 2.3). Posuvné rameno nebo rotující válec nahrne a zarovná práškový základní materiál [14]. Laserová hlava se pak pohybuje podle nastaveného programu a svazek fotonů spéká svrchní vrstvu prášku v požadované rovině řezu součásti. Poté je nanесena další vrstva prášku (obvykle po 0,1 mm), rovina řezu se úměrně zvedne a postupně se tak vytváří výrobek [1].

Aby se zabránilo nežádoucí oxidaci a degradaci kovového prášku, probíhá proces v uzavřené komoře s inertní atmosférou dusíku. Prášek je v komoře přehříván na teplotu blízkou tavení, což snižuje možnosti nežádoucích deformací (kroucení, smrštění) v důsledku nerovnoměrného ohřevu. Touto metodou je možno spékat všechny teplem tavitelné práškové materiály. Komerčně se nejvíce využívají termoplasty a nízko tavitelné kovové slitiny [14].



Obrázek 2.3 – Schéma metody SLS [14]

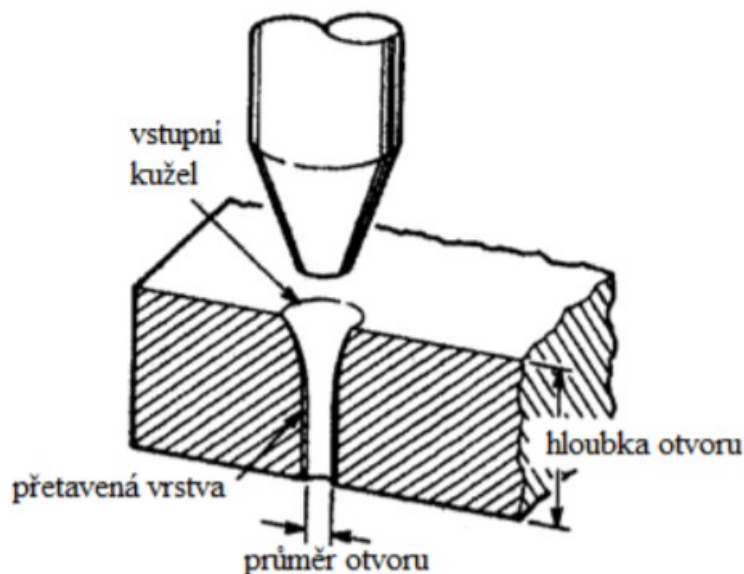
## 2.4 Vrtání laserovým paprskem

Při vrtání laserovým paprskem je povrch obrobku zahříván rychlostí  $1010\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ . Otvor se vytváří pomocí dvou souběžných dějů [13]:

- Část materiálu v oblasti středu paprsku, kde je maximální hustota výkonu, se odstraní vypařováním. Tímto způsobem pak paprsek proniká hlouběji do materiálu.
- Okolní materiál je ve formě taveniny vysokým tlakem par ( $10^3$  až  $10^4$  MPa) vytlačen velkou rychlostí ven z otvoru.

Technologií vrtání laserovým paprskem se obvykle zhotovují otvory o průměru 0,1 mm až 1,5 mm s hloubkou do 15 mm, přičemž poměr hloubky a průměru by měl být do 50:1 [15]. Do některých transparentních materiálů, např. skla, je možný i poměr přesahující 100:1 [16]. Jiná literatura udává, že se běžně vrtají otvory do hloubky 25 mm a experimentálně až 100 mm. Zhotovení takových otvorů ale trvá velmi dlouho [17]. Význačná je schopnost této technologie vrtat extrémně malé otvory o průměru třeba jen  $10\text{ }\mu\text{m}$  i ve špatně dostupných místech, kde to pomocí jiné technologie není možné [2].

Velice závisí na typu použitého laserového zdroje, např. CO<sub>2</sub> laser nezvládne otvor menší než  $\varnothing 0,2$  mm, zatímco Nd:YAG laser si poradí i s  $\varnothing 0,025$  mm. Délka impulsů se obvykle nastavuje v intervalu 0,5 ms až 2 ms s frekvencí 5 Hz až 20 Hz pro Nd:YAG lasery a až 100 Hz pro CO<sub>2</sub> [11]. Intenzita laserového paprsku se pro účely běžného vrtání oceli pohybuje v rozpětí  $10^5$  až  $10^7$  W.cm<sup>-2</sup> [18]. Je možné vrtat otvory průchozí (viz obr. 2.4) i slepé. Obvykle se využívá asistenčních plynů (např. vzduch, kyslík, dusík atd.) [13].

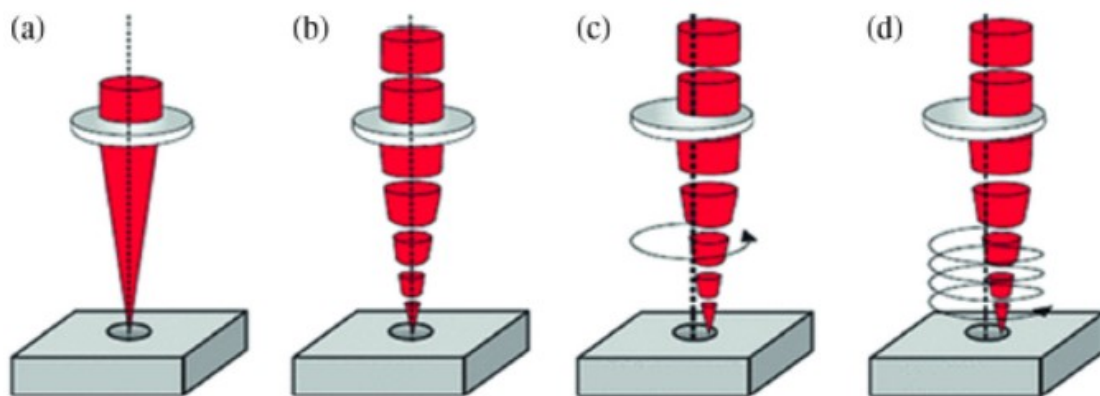


Obrázek 2.4 – Typický tvar vrtaného otvoru při ohnisku umístěném na povrch součásti [13]

Vrtat se dá pomocí kontinuálního i pulsního režimu paprsku, ale pulsní režim má výhodu nižšího tepelného zatížení obrobku. Při vrtání v pulsním režimu je hloubka otvoru dána intenzitou paprsku, počtem a frekvencí pulsů. Hloubka otvoru se s pulsy nejdříve postupně lineárně zvětšuje, ale v určité hloubce dosáhne svého maxima a dále se zvětšuje už jen průměr otvoru [13].

### 2.4.1 Metody vrtání laserovým paprskem

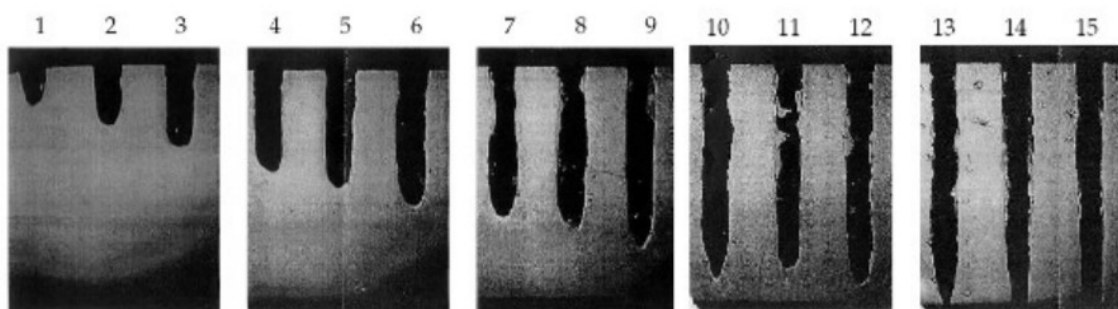
Rozlišujeme čtyři metody vrtání laserovým paprskem: vrtání jedním pulsem, perkusní, trepanační, a šroubovitě (viz obr. 2.5) [16].



Obrázek 2.5 – Vrtání (a) jedním pulsem, (b) perkusní, (c) trepanační, (d) šroubovitě [16]

Jedním pulsem o vysoké energii se dá do tenkého plechu (tloušťka do 3 mm) vyvrtat průchozí otvor o průměru až 1 mm nebo slepý otvor do plechu větší tloušťky [19]. Tato metoda vrtání je v porovnání s mechanickým vrtáním velice rychlá [16].

Princip perkusního vrtání už byl nastíněn v předchozí kapitole. Působením krátkého pulsu se část vrtaného materiálu odpaří a část je ve formě taveniny vytlačena pryč tlakem plynů. Opakováním tohoto postupu se pak vytváří otvor (viz obr. 2.6). Energie potřebná k vytlačení taveniny pryč z otvoru je asi čtvrtinová oproti energii potřebné k vypaření materiálu o daném objemu [20]. Poměr odpařeného materiálu a pouze vytlačené taveniny je asi 1:9, a právě ono tavení materiálu je zdrojem jednoho z hlavních problémů laserového obrábění – přetavené vrstvy (viz kapitola 2.4.4). Délka pulsů se běžně pohybuje v řádech  $10^{-12}$  až  $10^{-3}$  s, přičemž prodlevy mezi nimi bývají o něco delší. Touto metodou se vyrábí otvory o průměru do 1 mm a do tloušťky materiálu 20 mm [19].



Obrázek 2.6 – Ukázka perkusního vrtání průchozího otvoru pomocí 15 pulsů [19]

Trepanační vrtání je v podstatě řezání, protože dráha laserového paprsku kopíruje konturu zamýšleného otvoru, ale s tím rozdílem, že laserová hlava zůstává na místě a pohybuje se jen laserový paprsek. Používá se pro obrábění otvorů s průměrem do 3 mm. Literatura udává, že maximální tloušťka vrtaného materiálu pro průchozí otvor je 10 mm [19]. Tato metoda se používá pouze pro průchozí otvory. U tlustších materiálů se na začátku obrábění daného otvoru vytvoří zápal (širší pilotní otvor skrz materiál), který se ale umísťuje do části materiálu, která vypadne jako odpad, takže do součásti nijak nezasahuje. Poté se pilotní otvor postupně rozšiřuje sérií zvětšujících se kruhových pohybů, až se vytvoří požadovaný průměr. Je možno použít kontinuální i pulsní režim laseru [16].

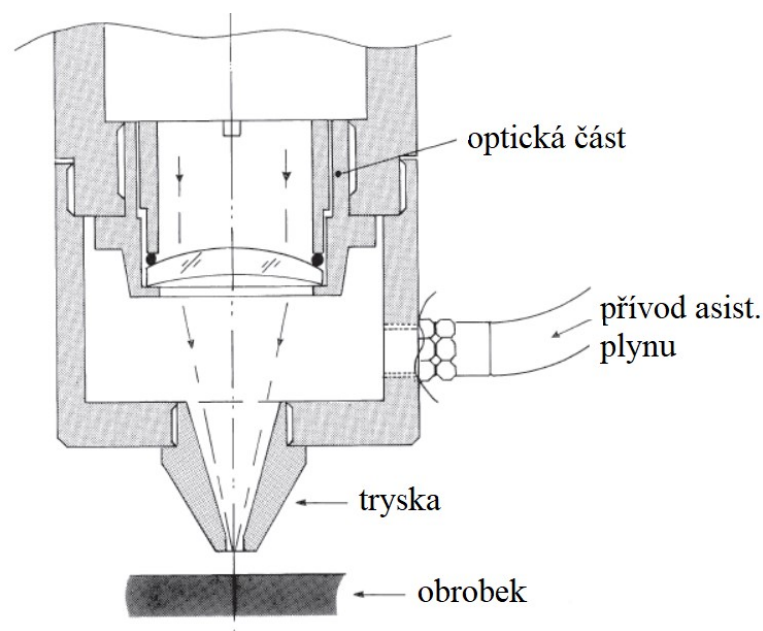
Šroubovitě vrtání vychází z vrtání trepanačního. Hlavním rozdílem je, že kromě polohy paprsku se s postupným prohlubováním otvoru mění i poloha ohniska a to tak, aby ohnisko bylo vždy na „dně“ otvoru, a vytváří tím pomyslnou šroubovici. Dalším rozdílem je, že se nevytváří zápal. Až laser pronikne skrz celou tloušťku materiálu, je vhodné ještě přidat několik průjezdů. Ty slouží k rozšíření spodní strany otvoru a začištění okrajů. Tímto způsobem je možno vyvrtat hlubší otvory než jinými metodami, a přitom zachovat vysokou kvalitu [16].

## **2.4.2 Asistenční plyny**

Při vrtání laserovým paprskem se stejně jakou příbuzných laserových technologií (svařování, řezání laserem atd.) využívají asistenční plyny. Ty jsou k obrobku přiváděny přímo přes trysku laserové hlavice, koaxiálně s laserovým svazkem (obr. 2.7). Nejběžněji používané plyny jsou kyslík, dusík, argon a stlačený vzduch. Přínosy každého plynu se liší podle jeho fyzikálních vlastností, ale dva „úkoly“ mají všechny plyny společné – chránit laserovou hlavu od rozstříknuté taveniny a vyfoukávat taveninu pryč z vrtaného otvoru [17].

Kyslík se používá pro svou silně exotermickou reakci s železem. V minulosti se tímto způsobem dal do určité míry kompenzovat slabý výkon laserového zdroje, ale dnešní zdroje už mají výkonu dostatek a toto navíc dodané teplo slouží hlavně k urychlení celého procesu obrábění [17]. Nevýhodou je, že obráběná plocha je pak pokryta vrstvou oxidů [21].



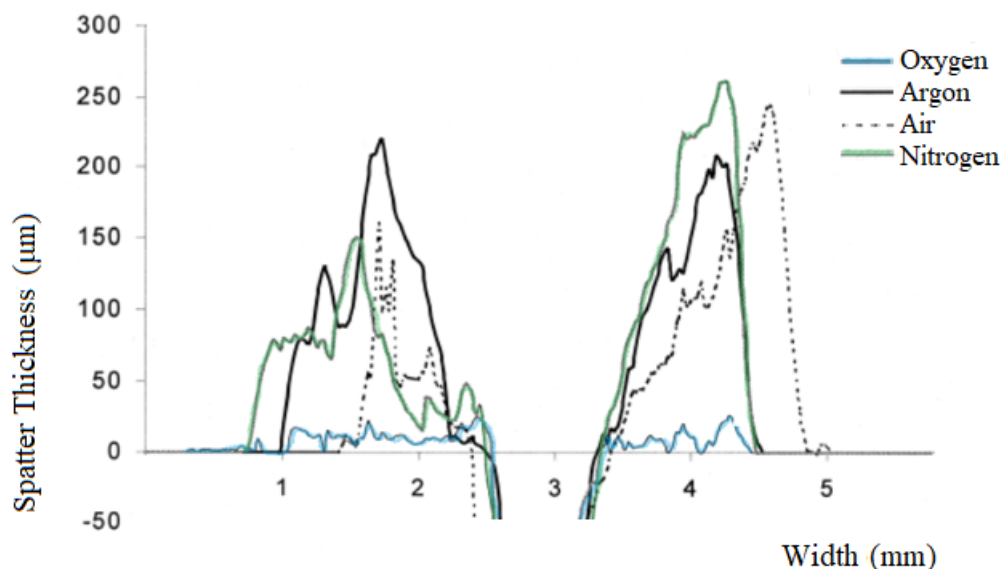


Obrázek 2.7 – Schéma laserové hlavy [17]

Dusík a argon, patřící mezi inertní plyny, se využívají hlavně pro obrábění neželezných kovů, např. titan. Používají se, když je potřeba co nejvíce zabránit oxidaci přetavené vrstvy. U těchto plynů je důležité dbát na jejich co nejvyšší čistotu, protože např. i pouhých 0,005 % kyslíku dokáže na nerezavějící oceli způsobit viditelnou oxidaci obrobeneho povrchu. Proto se doporučuje používat argon či dusík čistoty 5.0 (99,999 %) [21].

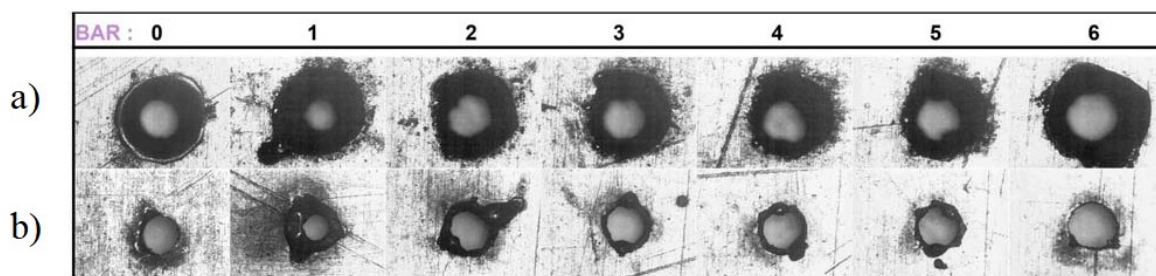
Stlačený vzduch je směs výše uvedených plynů (79 % dusíku, 21 % kyslíku, 0,93 % argonu a zbytek další plyny) [24]. Bohužel kombinuje spíše nevýhody jednotlivých plynů. Neposkytuje ani vysokou kvalitu, ani rychlost, ale zato je nejlevnější, a proto je používán velmi často [17].

Na téma vlivu různých asistenčních plynů proběhla studie, ve které byly za použití kyslíku, dusíku, argonu a stlačeného vzduchu perkusní metodou vrtány otvory do plechu ze slitiny NIMONIC 263 o tloušťce 2,6 mm. Průměr otvorů byl 0,5 mm. Předmětem studie bylo množství rozstříknuté taveniny kolem horní části otvoru. Jeden z výsledků experimentu je zachycen na obrázku 2.8. Tloušťka rozstříku byla při použití kyslíku pouhých 10 až 20 % oproti ostatním asistenčním plynům. Autoři studie v závěru uvádí, že příčinou tohoto výsledku je právě exotermická reakce, protože část taveniny při reakci s kyslíkem shoří, zatímco ostatní asistenční plyny ji jen vytlačí do okolí otvoru, kde se ochladí a ztuhne [22].



Obrázek 2.8 – Rozměry rozstříku okolo vrtaného otvoru při použití různých asistenčních plynů [22] Spatter Thickness – tloušťka rozstříku, Width – šířka, Oxygen – kyslík, Air – vzduch, Nitrogen - dusík

V souvislosti s asistenčními plyny je vhodné zmínit také jejich tlak, neboť se jedná o jeden z důležitých parametrů procesu vrtání laserovým paprskem. Obvykle se nastavuje v řádech jednotek až desítek barů [21]. Tlakem asistenčního plynu, konkrétně kyslíku, se zabývala studie, během které bylo laserovým paprskem vyvrtáno 7 průchozích otvorů za použití tlaku kyslíku 0 až 6 barů. (obr. 2.9) [23].



Obrázek 2.9 – Vliv tlaku asistenčního plynu na vrtaný otvor – a) horní hrana, b) spodní hrana [23]

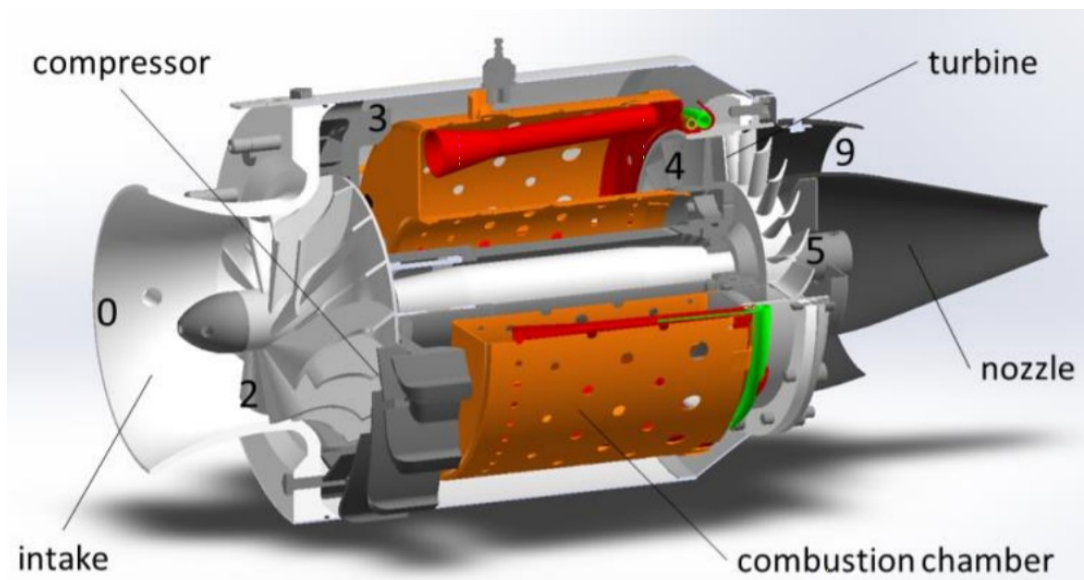
Tato studie řešila vzhled otvoru, průměr otvoru a rychlost vrtání v závislosti na tlaku asistenčního plynu. Autor konstatuje, že použitý tlak asistenčního plynu je v porovnání s tlakem plynů uvnitř otvoru během vrtání, který se pohybuje v řádech stovek barů, velice malý, takže se zdá, že kyslík do otvoru během vrtání vůbec nepronikne. Vytlačovat taveninu začne až když je otvor skrz zcela průchozí. Co se týče průměru otvoru na horní straně plechu,

tak ten se s rostoucím tlakem asistenčního plynu zvětšoval, a to kvůli dodatečnému teplu z exotermické reakce, které dále natavuje povrch otvoru. Spodní část otvoru se s rostoucím tlakem rovněž zvětšovala a také na ni bylo méně strusky. Mimo jiné bylo ještě zjištěno, že tlak asistenčního plynu na rychlost vrtání nemá zásadní vliv [23].

### 2.4.3 Aplikace vrtání laserem

Jednou z hlavních aplikací vrtání laserovým svazkem je vrtání otvorů ve spalovacích komorách letadlových motorů (obr. 2.10). Tyto otvory přivádějí studený vzduch, který se buď smísí s horkými plyny uvnitř komory nebo je využit k přímému chlazení plamence či lopatek turbíny na přijatelnější teplotu.

Všechny tyto součásti vystavené vysokým teplotám jsou vyrobeny ze speciálních superslitin, jež jsou obtížně obrobitelné, a tak by konvenční mechanické metody vrtání byly nákladné a pomalé [25]. Zadavatel při testování zjistil, že vrtání otvoru o průměru 0,8 mm klasickým vrtákem trvá přibližně jednu minutu, a navíc se vrtáky občas lámaly, oproti tomu laserovému zařízení zabere vyvrtání téže díry méně než 1 sekundu. S přihlédnutím k faktu, že do jedné spalovací komory se obvykle vrtají tisíce otvorů, je rozdíl výrobních časů opravdu velký – na jedné spalovací komoře až desítky hodin [26].



Obrázek 2.10 – Model spalovací komory s chladicími otvory [27]  
compressor – kompresor, intake – sání, combustion chamber – spalovací komora,  
turbine – turbína, nozzle – tryska

Mezi další časté aplikace vrtání laserem patří vrtání do keramiky (excimerové lasery), nekovových materiálů, skla, plastů (CO<sub>2</sub> lasery), diamantů a různých druhů oceli (Nd:YAG lasery) [11].

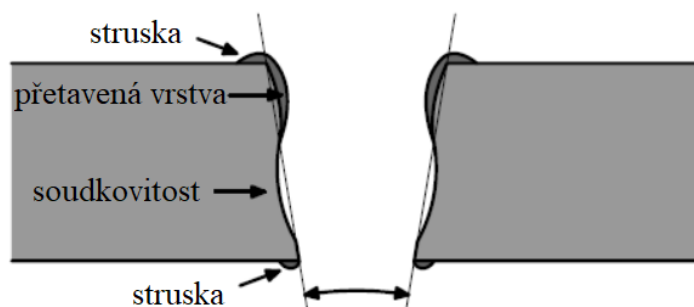
#### 2.4.4 Klady a zápory vrtání laserovým paprskem

Mezi výhody technologie vrtání laserem patří [16]:

- rychlost,
- nedochází k fyzickému kontaktu nástroje s obrobkem,
- vysoký poměr hloubky a průměru otvoru (viz kapitola 2.4),
- lze aplikovat na širokou škálu materiálů (ocel, dřevo, keramika, diamant...),
- vhodnost k plné automatizaci.

Ani vrtání laserovým paprskem však není dokonalé. Je totiž doprovázeno těmito negativními prvky [16]:

- geometrická nepřesnost,
- vysoká pořizovací cena zařízení,
- kuželovitost („tapering“) – směrem do tloušťky materiálu se otvor zužuje,
- soudkovitost („barreling“) – lokálním zvětšením průměru,
- ulpívání strusky na obou koncích otvoru (viz obr. 2.11),
- vznik mikrotrhlin,
- relativně široká vrstvou přetaveného materiálu.



Obrázek 2.11 – Schéma laserem vrtaného otvoru [19]

Výše zmíněná negativa ale částečně neplatí pro lasery s extrémně krátkými pulsy. Při dalším experimentu s použitím femtosekundového laseru bylo dosaženo otvorů do oceli (a skla) bez ulpívající strusky a tepelného poškození. Navíc nebyly nalezeny žádné trhliny.

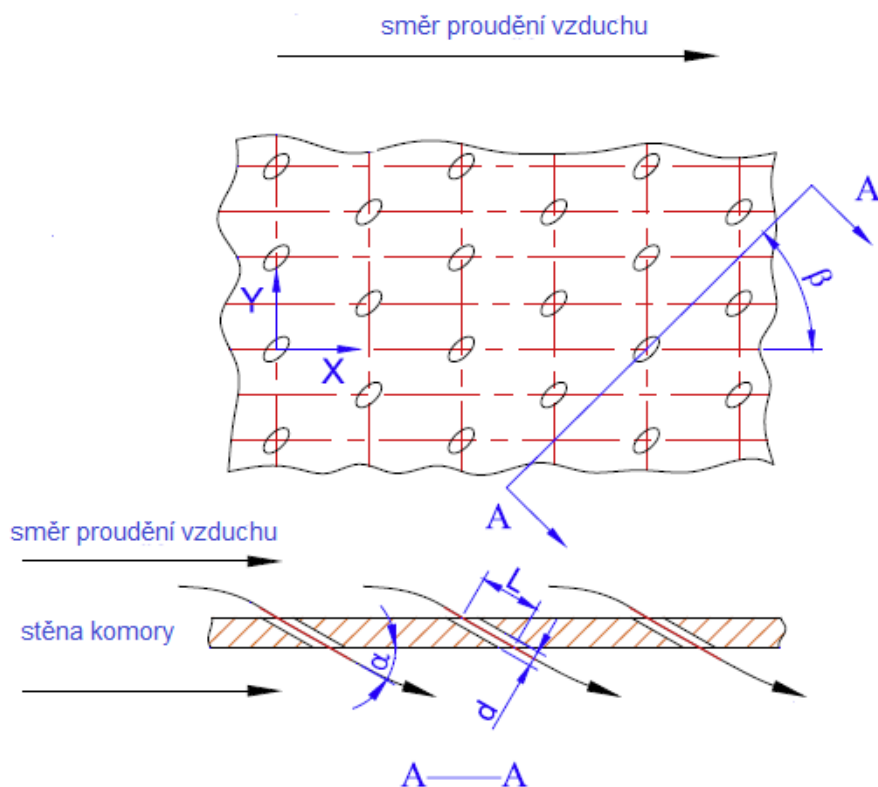
Lze tak usoudit, že čím kratší je puls laserového paprsku, tím tyto negativní jevy slábnou a na úrovni femtosekund ( $10^{-15}$  s) mizí [28]. Důležité však je uvědomit si, že těchto výsledků bylo dosaženo v oblasti mikroobrábění (otvory ve zmíněném experimentu měly průměry v řádech desítek a stovek  $\mu\text{m}$ ).

V jiném experimentu bylo laserem vrtáno do niklové slitiny INCONEL 718, která je velmi často používána v odvětví leteckého průmyslu. Vzhledem k určitým společným aspektům s experimentální částí této diplomové práce je možné očekávat alespoň řádovou podobnost některých naměřených výsledků. Při vrtání laserovým paprskem s krátkým pulsem do plechu o tloušťce 1 mm byla naměřena přetavená vrstva o průměrné tloušťce 0,0465 mm. V experimentu je konstatováno, že délka vznikajících mikrotrhlin souvisí s tloušťkou přetavené vrstvy a také roste s délkou pulsu. Průměrná délka mikrotrhliny u daného plechu byla 0,0036 mm. Experiment mimo jiné porovnával vrtání laserové a mechanické. Zjistil, že přetavená vrstva se sice vyskytuje i u vrtání mechanického, ale její šířka je v porovnání s přetavenou vrstvou po vrtání laserem řádově menší a pro potřeby leteckého průmyslu je zanedbatelná (mezí hodnoty dovolené průměrné tloušťky přetavené vrstvy jsou v řádech desetin milimetru) [26].

### 3. Průvodní informace k experimentu

Tématem experimentu bylo hodnocení vlivu druhu a tlaku asistenčního plynu (kyslíku a dusíku) na proces laserového vrtání se zaměřením na tloušťku přetavené vrstvy pomocí metalografické zkoušky. Zadavatelem je firma, která se zabývá výrobou součástí pro letecký průmysl, proto experiment reprezentuje vrtání chladících otvorů ve spalovacích komorách letadlových motorů.

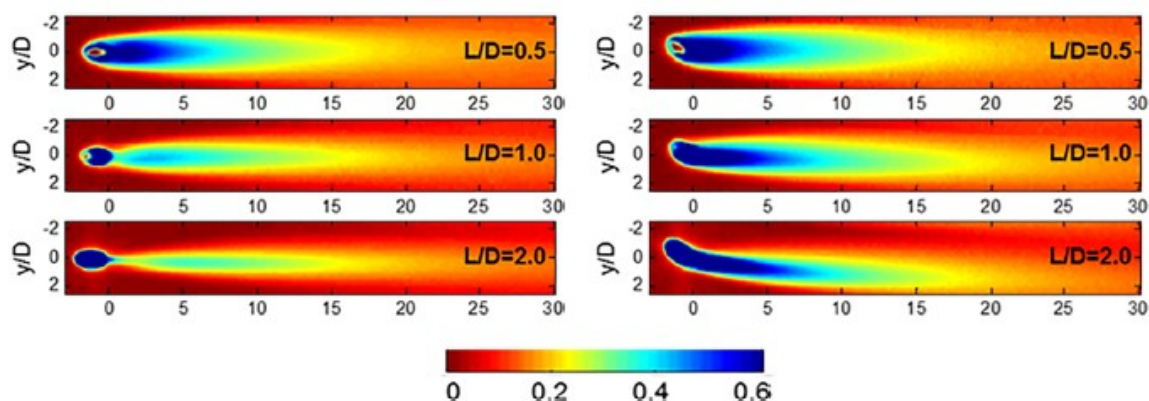
Význam těchto chladících otvorů roste se snahou zvyšování účinnosti plynových turbín, což sebou nese zvyšování tlaků a teplot působící na materiál, a proto je studium proudění vzduchu přes chladící otvory důležité [33]. Mezi parametry otvorů patří poměr jejich průměru ( $d$ ) a délky ( $L$ ), hustota, úhel vrtání ( $\alpha$ ) a úhel natočení vzhledem ke směru proudění vzduchu ( $\beta$ ) (viz obr. 3.1). Cílem není ochladit plyn v turbíně, ale vytvořit tenkou vrstvu vzduchu na povrchu komory, který ji bude před zahřátým plynem chránit (tzv. film cooling) [34].



Obrázek 3.1 – Schéma možné geometrie chladících otvorů [33]

Vliv geometrie chladících otvorů zkoumala studie z roku 2017. Porovnávali efektivitu otvorů s různými poměry délky a průměru otvoru při různém úhlu natočení  $\beta$  ( $0^\circ$  a  $45^\circ$ ) a při různém poměru  $M$  (anglicky označován blowing ratio), který popisuje podíl množství chladícího a chlazeného plynu. Závěrem studie je, že pokud je poměr délky a průměru ( $L/D$ )

otvoru malý, má úhel natočení ( $\beta$ ) jen malý vliv, ale při větší hodnotě  $L/D$  může úhel natočení zlepšit chladicí účinek otvoru (viz obr. 3.2), zejména při relativně velkém poměru  $M$  [34].



Obrázek 3.2 – Vliv úhlu natočení  $\beta$  (levý sloupec  $\beta = 0^\circ$ , pravý  $\beta = 45^\circ$ ,  $L/D$  i  $M$  vždy konstantní) [34]

V praxi jsou chladicí otvory jedné spalovací komory naorientovány různě, a to podle výsledků ze simulačního softwaru. Z tohoto důvodu je nutné, že technologie použitá pro jejich výrobu musí být dostatečně flexibilní, což laser splňuje.

### 3.1 Zkušební materiál

Jako zkušební materiál byl zvolen Haynes 230. Jedná se o slitinu na bázi niklu, jejíž kompletní chemické složení je uvedeno v tabulce 3.1 [29].

Tabulka 3.1 – Chemické složení slitiny Haynes 230 [29]

Ni	Cr	W	Mo	Fe	Co	Mn	Si	Nb	Al	Ti	C	La	B
57	22	14	2	3	5	0,5	0,4	0,5	0,3	0,1	0,1	0,02	0,015

(hodnoty uvedeny v hmotnostních procentech)

Haynes 230 se vyznačuje vysokou pevností při vysokých teplotách (viz tab. 3.2), výbornou odolností proti oxidaci při teplotě do  $1149^\circ\text{C}$  a dobrou odolností proti tečení. Oproti jiným žáruvzdorným a žárupevným slitinám vyniká nízkou teplotní roztažností. Je dobře svařitelná obvyklými metodami obloukového a odporového svařování [29].



Tabulka 3.2 – Mechanické vlastnosti slitiny Haynes 230 za zvýšených teplot [29]

Teplota (°C)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)
21	417	837	47,3
538	294	690	51,7
649	291	666	56,9
760	311	538	59,5
871	236	308	74,2
982	123	169	54,1
1093	69	90	37

Pro své vlastnosti se Haynes 230 používá v leteckém, kosmickém, chemickém a energetickém průmyslu, například jako součásti plynových turbín nebo v průmyslových pecích. Výrobce této slitiny udává, že je obzvláště výhodná pro dlouhodobé použití v prostředí s teplotou nad 650 °C, protože oproti svým konkurentům, např. Haynes 188 a Haynes 625 při teplotách v rozmezí od 650 do 871 °C ani po 16 000 hodinách nevylučuje škodlivé fáze (např. sigma fáze). Fáze precipitující z tuhého roztoku jsou vždy karbidy. Dalšími konkurenty, tedy materiály s obdobným použitím, jsou např. INCONEL 601, INCONEL 718, INCOLOY 800H a NeoNickel 253MA® [29].

Na obrázku 3.3 je podle výrobce vidět typická mikrostruktura této slitiny (ve stavu po žíhání při 1230 °C [30]).



Obrázek 3.3 – Typická mikrostruktura slitiny Haynes 230 [30]



### 3.2 Použitá zařízení

Výroba vzorků byla provedena na zařízeních poskytnutých zadavatelem, konkrétně na laserovém stroji Winbro Delta se zdrojem laserového paprsku IPG YLS-2000/20000-QCW. Pro přípravu vzorků v metalografické laboratoři byla použita pila LECO MXS 255, broušení a leštění bylo provedeno na automatickém stroji Buehler AutoMet 300 a na ručním stroji značky Allied. K měření byl použit optický mikroskop Olympus GX51.

Winbro Delta je laserové obráběcí centrum (viz obr. 3.4) operující v 5 osách, které bylo navrženo speciálně k výrobě velkých součástí pro letecký a IGT (industrial gas turbines) průmysl. Maximální rozměry obráběné součásti jsou průměr 1900 mm x 900 mm (průměr x výška) do hmotnosti až 500 kg. Lineární přesnost stroje je 0,015 mm a úhlová přesnost stroje je 15 ". Stroj je řízen systémem Heidenhain iTNC 530. Možnost propojení s CAM softwarem dovoluje 3D obrábění tvarově složitých součástí. Stroj je dále vybaven kapacitním snímačem vzdálenosti trysky od obrobku, dotykovou sondou, systémem ochrany proti kolizi hlavice s obrobkem a systémem pro rychlou výměnu hlavic [31].



*Obrázek 3.4 – Obráběcí centrum Winbro Delta [31]*

Možnosti využití tohoto stroje jsou následující [31]:

- vrtání,
- řezání,
- ablace,
- navařování,
- svařování.

Vzduchem chlazený zdroj laserového paprsku IPG YLS-2000/20000-QCW spadá do kategorie moderních laserů, kde je složitá a na údržbu náročná optická soustava čoček nahrazena optickým vláknem, které je v tomto případě dotováno ytterbiem. Umí pracovat v kvazi-kontinuálním i pulsním režimu. Podle výrobce je vhodný pro použití v leteckém průmyslu, zejména pro účely vrtání (trepanační i perkusní), řezání, svařování a povrchové úpravy. Tento zdroj vytváří infračervený laserový paprsek o vlnové délce 1,07  $\mu\text{m}$ . Maximální průměrný výkon činí 2 300 W v kvazi-kontinuálním i pulsním režimu, přičemž délka pulsu může být od 0,2 do 10 ms [32].



Obrázek 3.5 – Zdroj YLS-2000/20000-QCW [32]

### 3.3 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly vyrobeny z plechu materiálu Haynes 230. Průměr otvorů byl 0,5 mm. Otvory byly vrtány pod úhlem  $\alpha = 24^\circ$  respektive  $34^\circ$  (úhel  $\alpha$  je vyznačen na obr. 3.1). Otvory s úhlem  $\alpha = 24^\circ$  byly vrtány do plechu tloušťky 0,8 mm, zatímco otvory s úhlem  $\alpha = 34^\circ$  musely být kvůli souladu s licencemi zadávající firmy zhotoveny do plechu tloušťky

1 mm. Zadavatel sám navrhl toto řešení na základě potřeb a hodnot používaných při výrobě. Vliv rozdílu 0,2 mm v tloušťce plechů na přetavenou vrstvu je dle zkušeností zadavatele zanedbatelný. Další proměnlivé parametry výroby byly druh asistenčního plynu (kyslík, dusík) a tlak asistenčního plynu (1, 2 a 4 bary). Takto vzniklo 12 variant parametrů (=skupin), přičemž každá varianta byla zhotovena třikrát kvůli ověření opakovatelnosti. Z hlediska statistiky bylo lepší vyrobit více vzorků každé varianty, ale s ohledem na co nejmenší narušení výroby a kapacitní vytížení metalografické laboratoře byl experiment po domluvě se zadavatelem navolen takto (viz tab. 3.3).

*Tabulka 3.3 – Matice vyrobených vzorků*

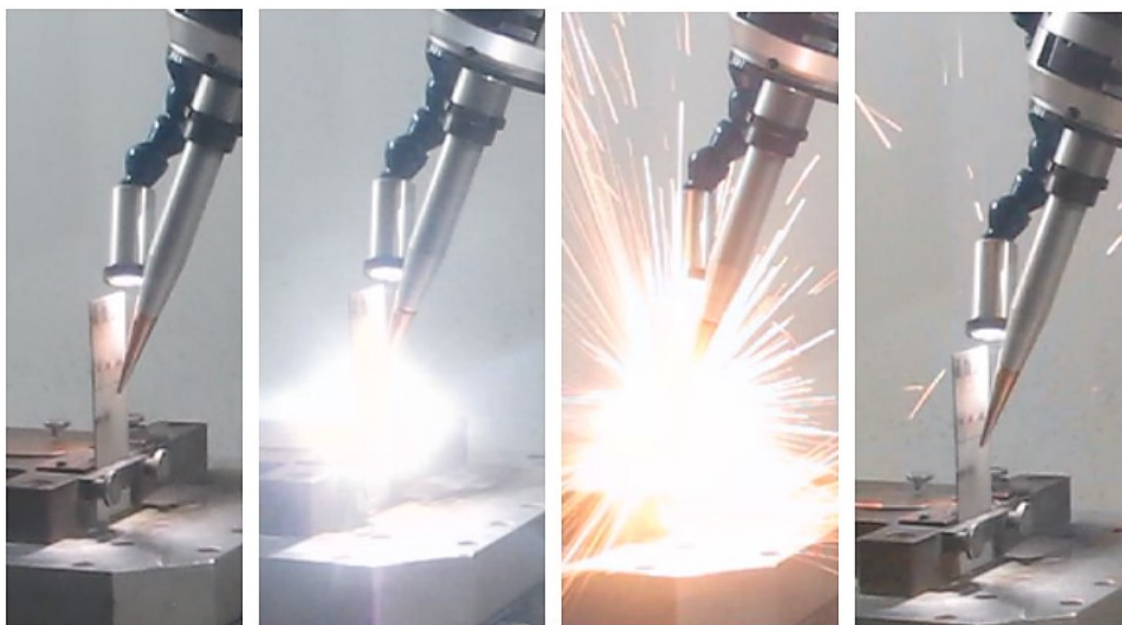
<i>Označení vzorku</i>	<i>Tloušťka plechu (mm)</i>	<i>Asistenční plyn</i>	<i>Tlak asist. plynu (bar)</i>	<i>Úhel vrtání otvoru <math>\alpha</math> (°)</i>
1A	0,8	O <sub>2</sub>	1	24
1B	0,8	O <sub>2</sub>	1	24
1C	0,8	O <sub>2</sub>	1	24
2A	0,8	O <sub>2</sub>	2	24
2B	0,8	O <sub>2</sub>	2	24
2C	0,8	O <sub>2</sub>	2	24
3A	0,8	O <sub>2</sub>	4	24
3B	0,8	O <sub>2</sub>	4	24
3C	0,8	O <sub>2</sub>	4	24
4A	0,8	N <sub>2</sub>	1	24
4B	0,8	N <sub>2</sub>	1	24
4C	0,8	N <sub>2</sub>	1	24
5A	0,8	N <sub>2</sub>	2	24
5B	0,8	N <sub>2</sub>	2	24
5C	0,8	N <sub>2</sub>	2	24
6A	0,8	N <sub>2</sub>	4	24
6B	0,8	N <sub>2</sub>	4	24
6C	0,8	N <sub>2</sub>	4	24
7A	1	O <sub>2</sub>	1	34
7B	1	O <sub>2</sub>	1	34
7C	1	O <sub>2</sub>	1	34

Tabulka 3.3 – Matice vyrobených vzorků – pokračování

Označení vzorku	Tloušťka plechu (mm)	Asistenční plyn	Tlak asist. plynu (bar)	Úhel vrtání otvoru $\alpha$ (°)
8A	1	O <sub>2</sub>	2	34
8B	1	O <sub>2</sub>	2	34
8C	1	O <sub>2</sub>	2	34
9A	1	O <sub>2</sub>	4	34
9B	1	O <sub>2</sub>	4	34
9C	1	O <sub>2</sub>	4	34
10A	1	N <sub>2</sub>	1	34
10B	1	N <sub>2</sub>	1	34
10C	1	N <sub>2</sub>	1	34
11A	1	N <sub>2</sub>	2	34
11B	1	N <sub>2</sub>	2	34
11C	1	N <sub>2</sub>	2	34
12A	1	N <sub>2</sub>	4	34
12B	1	N <sub>2</sub>	4	34
12C	1	N <sub>2</sub>	4	34

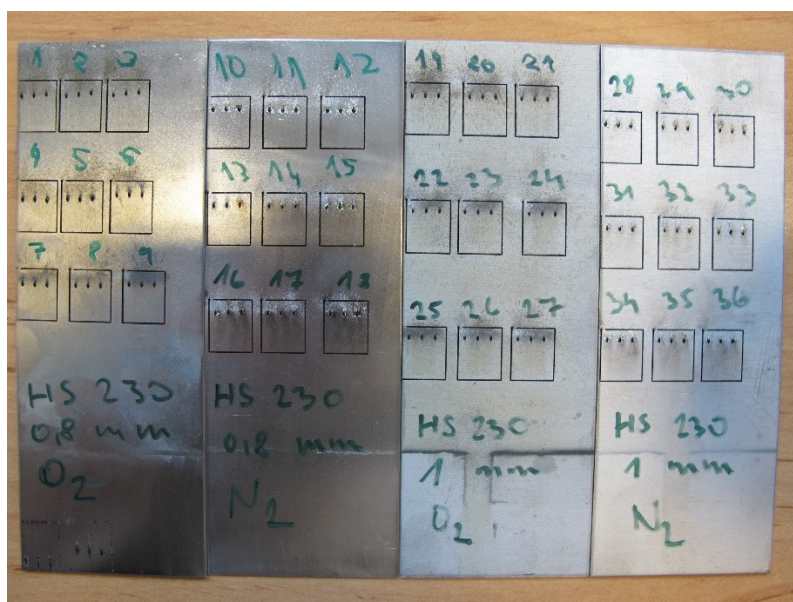
## 4. Experimentální část

Každý otvor byl zhotoven pomocí 5 pulsů. Doba každého pulsu byla 1 ms. Špičkový výkon laseru byl 12 kW a energie jednotlivých pulsů byla 12 J. Ohnisko bylo umístěno 2 mm nad povrch plechu. Ostatní parametry nejsou uvedeny z licenčních důvodů. Reálný průběh vrtání jednoho otvoru z experimentu zachycuje obr. 4.1. Po přezkoušení kalibrem bylo zjištěno, že průměry jednotlivých otvorů se mírně lišily (odchylka přibližně  $\pm 0,03$  mm). To ale pro daný experiment nemá žádný význam, neboť geometrie otvoru není předmětem této práce. Navíc se očekávalo, že skutečný průměr bude v průběhu hloubky otvoru značně nestálý, což by měly prokázat snímky z metalografie. Obecně ale platí, že průměry děr byly zaokrouhleně 0,5 mm.



*Obrázek 4.1 – Vrtání otvoru*

Otvory byly vrtány do malých pásků plechu příslušné tloušťky. Do každého pásku bylo umístěno 9 plátků se 3 otvory. Všechny vyrobené otvory jsou zachyceny na obr. 4.2. Jak je vidět, každý vzorek z tabulky 4.1 byl nakonec vyroben třikrát. Důvodem pro toto rozhodnutí byl fakt, že část broušení v rámci přípravy na metalografii se dělá ručně, což může vyústit v chybu a znehodnocení vzorku, takže ke každému zamýšlenému vzorku z tabulky 4.1 byly zhotoveny další 2 kusy jako rezerva. Celkem bylo vyvrtáno 108 otvorů. Samotné vrtání jednoho otvoru bylo otázkou přibližně sekundy, takže k výraznému zpomalení výroby nedošlo. Jednotlivé plátky se třemi otvory byly vyřezány z okolního plechu a držely jen díky malému můstku. Ten umožnil snadné vyloupnutí z plechu, takže nebylo zapotřebí jednotlivé plátky z plechu zdlouhavě vyřezávat na pile.



Obrázek 4.2 – Vyrobené vzorky

Po výrobě otvorů následovala příprava vzorků v metalografické laboratoři (obr. 4.3). Práce proběhla podle následujícího postupu:

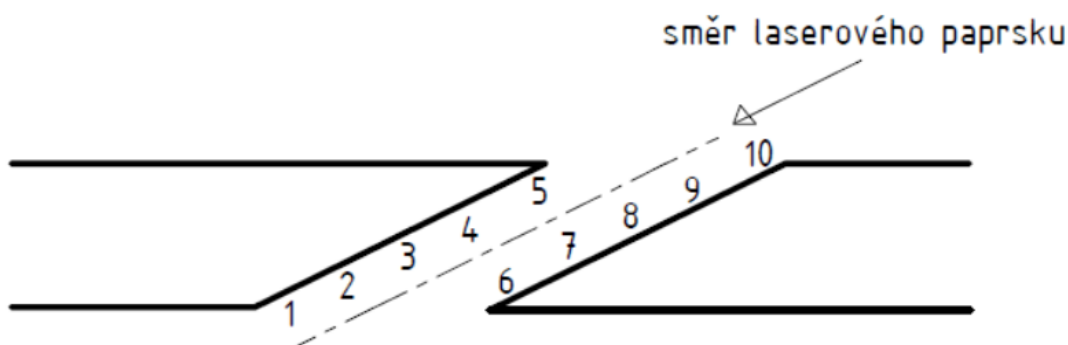
1. popis jednotlivých plátků,
2. čištění plátků v ethanolu a následně v acetonu,
3. sušení v peci (5 minut, 68 °C),
4. namíchání zalévací hmoty,
5. uchycení plátků do plastových sponek a umístění do forem,
6. zalití plátků zalévací hmotou,
7. označení vzorků,
8. vytvrzení vzorků v peci (90 minut, 68 °C),
9. broušení,
10. leštění,
11. leptání.



*Obrázek 4.3 – Fotografie z přípravy metalografických vzorků*

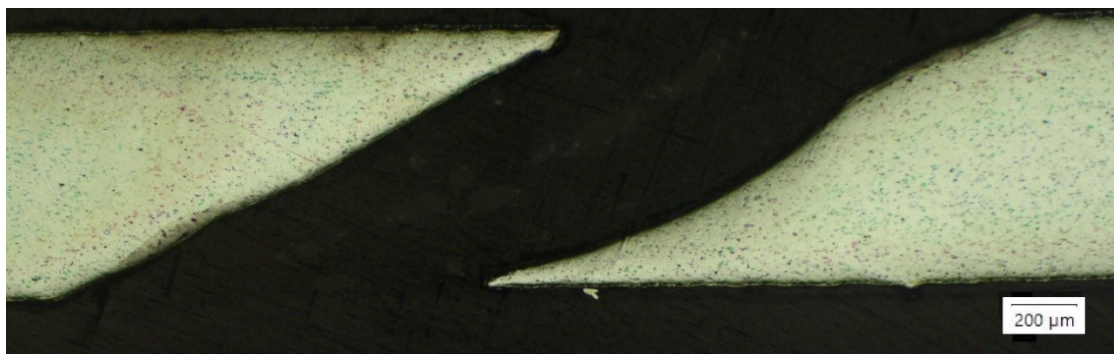
Pro fixaci vzorků byla použita transparentní epoxidová zalévací hmota CaldoFix-2, která je vhodná pro zalévání za studena. Použitý poměr tvrdidla a pryskyřice byl 1:3,6. Po vytvrzení v peci byly vzorky lehce očištěny od lepící pásky a připraveny na broušení. Cílem bylo dobrousit se co nejblíže k ose otvoru, což nešlo dělat jinak než ručně. Byly použity brusné papíry P60 a P1200. Po vybroušení do požadované hloubky byly vzorky očištěny a následovalo leštění pomocí leštícího plátna a diamantové pasty s velikostí částic 3  $\mu\text{m}$ . Po vyleštění byly vzorky očištěny, osušeny a elektrolyticky naleptány v 10% kyselině šťavelové ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ). Poté byly vzorky naposledy očištěny vodou a ethanolem, osušeny a konečně připraveny na zkoumání pod mikroskopem. Měření přetavené vrstvy probíhalo při 500x zvětšení.

Metodika měření byla zvolena dle zvyklostí firmy, ve které celý experiment probíhal. Délka otvoru každého vzorku byla v řezu rozdělena do desíti pomyslných oblastí, ve kterém byla měřena tloušťka přetavené vrstvy. To znamená, že na každém vzorku proběhlo deset měření, a k tomu navíc měření případných nalezených mikrotrhlin. Schéma měření je znázorněno na obr. 4.4, skutečný snímek z mikroskopu pak na obr. 4.5.



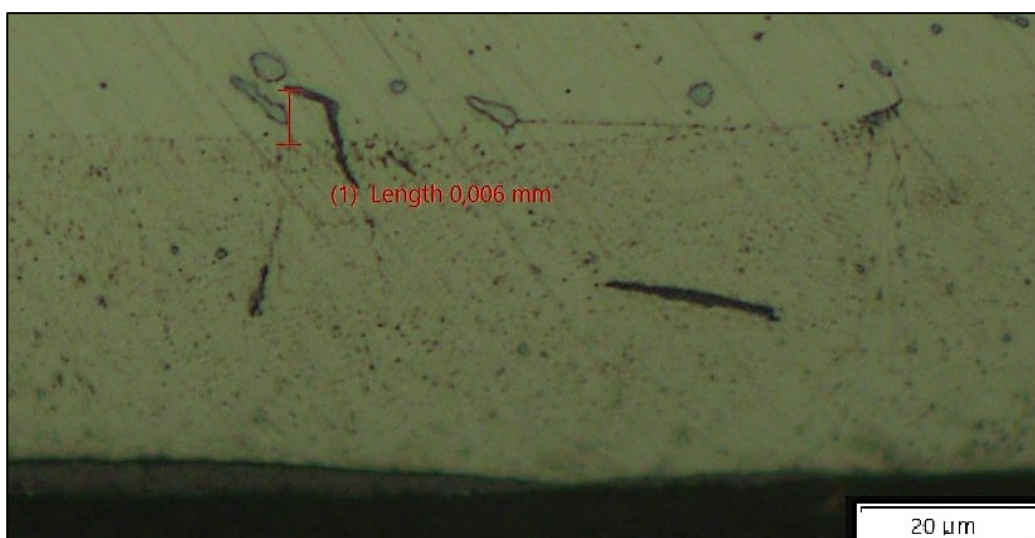
*Obrázek 4.4 – Schéma měření vzorku*





*Obrázek 4.5 – Skutečný vzorek pod mikroskopem*

U mikrotrhlin je ještě nutné zmínit, že měřeny a počítány byly jen mikrotrhliny procházející z přetavené vrstvy až do základního materiálu. Ty totiž mohou výrazně snížit únavové vlastnosti součásti, což je v leteckém průmyslu kritické. Jednu z mikrotrhlin nalezených během měření tohoto experimentu lze vidět na obr. 4.6.



*Obrázek 4.6 – Mikrotrhlina procházející z přetavené vrstvy do základního materiálu*

#### **4.1 Naměřené hodnoty přetavené vrstvy a mikrotrhlin**

Na každém vzorku (1A až 12C) bylo provedeno deset měření tloušťky přetavené vrstvy ( $PV$ ) dle výše uvedeného schématu, dále pak délka nejdelší nalezené mikrotrhliny v základním materiálu ( $L_{max}$ ) a celkový počet nalezených relevantních mikrotrhlin ( $N$ ). Všechny naměřené hodnoty jsou obsaženy v tab. 4.1.



Tabulka 4.1 – Naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy, délky a množství mikrotrhlin

	Tloušťka přetavené vrstvy PV										<i>L</i> <sub>max</sub>	<i>N</i>
	(mm)										(mm)	(-)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1A	0,058	0,028	0,048	0,026	0,008	0,007	0,009	0,017	0,033	0,025	0,007	2
1B	0,050	0,045	0,034	0,038	0,011	0,004	0,003	0,005	0,042	0,030	0,008	3
1C	0,050	0,044	0,032	0,026	0,023	0,005	0,006	0,043	0,039	0,038	0,010	9
2A	0,063	0,038	0,035	0,027	0,034	0,002	0,009	0,015	0,037	0,028	0,009	3
2B	0,051	0,055	0,035	0,026	0,014	0,003	0,007	0,022	0,045	0,021	0,009	2
2C	0,053	0,030	0,035	0,031	0,004	0,008	0,005	0,006	0,043	0,033	0,010	6
3A	0,035	0,037	0,016	0,022	0,015	0,001	0,007	0,003	0,008	0,019	0,005	3
3B	0,037	0,024	0,025	0,014	0,008	0,003	0,011	0,005	0,024	0,028	0,001	1
3C	0,048	0,027	0,017	0,011	0,005	0,006	0,016	0,004	0,018	0,040	0,005	2
4A	0,058	0,035	0,019	0,019	0,011	0,004	0,020	0,045	0,008	0,035	0,006	4
4B	0,050	0,063	0,026	0,025	0,012	0,004	0,017	0,027	0,048	0,050	0,005	3
4C	0,029	0,065	0,016	0,024	0,006	0,006	0,018	0,005	0,007	0,010	0,020	3
5A	0,050	0,046	0,024	0,007	0,018	0,009	0,016	0,029	0,032	0,010	0,011	3
5B	0,047	0,027	0,016	0,011	0,013	0,002	0,010	0,021	0,034	0,051	0,007	3
5C	0,047	0,038	0,020	0,012	0,009	0,006	0,012	0,020	0,031	0,025	0,011	7
6A	0,027	0,039	0,01	0,004	0,009	0,010	0,005	0,006	0,005	0,011	0,008	5
6B	0,059	0,015	0,011	0,008	0,023	0,007	0,015	0,006	0,008	0,010	0,011	3
6C	0,029	0,061	0,010	0,012	0,024	0,007	0,003	0,005	0,004	0,008	0,008	2
7A	0,044	0,032	0,008	0,006	0,004	0,001	0,004	0,004	0,003	0,005	0,011	6
7B	0,049	0,027	0,008	0,010	0,004	0,002	0,005	0,002	0,005	0,009	0,008	2
7C	0,05	0,036	0,020	0,004	0,003	0,001	0,002	0,004	0,006	0,006	0,014	3
8A	0,024	0,023	0,023	0,005	0,008	0,001	0,004	0,006	0,007	0,009	0,010	2
8B	0,037	0,032	0,016	0,004	0,005	0,001	0,003	0,005	0,006	0,009	0,012	4
8C	0,054	0,027	0,021	0,004	0,006	0,002	0,004	0,005	0,005	0,008	0,008	5
9A	0,040	0,018	0,017	0,014	0,007	0,002	0,009	0,012	0,032	0,022	0,011	4
9B	0,040	0,015	0,019	0,004	0,003	0,008	0,005	0,006	0,006	0,008	0,009	4
9C	0,033	0,020	0,016	0,008	0,004	0,001	0,003	0,005	0,008	0,009	0,009	2
10A	0,058	0,045	0,016	0,008	0,007	0,012	0,013	0,006	0,007	0,006	0,006	4
10B	0,061	0,018	0,015	0,012	0,004	0,003	0,012	0,005	0,007	0,006	0,007	1
10C	0,055	0,032	0,015	0,010	0,019	0,002	0,010	0,008	0,006	0,007	0,008	2

Tabulka 4.1 – Naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy, délky a množství mikrotrhlin – pokračování

	Tloušťka přetavené vrstvy PV										$L_{max}$	$N$
	(mm)										(mm)	(-)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
11A	0,056	0,010	0,019	0,005	0,006	0,006	0,004	0,004	0,004	0,007	0,008	1
11B	0,042	0,012	0,015	0,008	0,007	0,013	0,005	0,005	0,006	0,010	0,008	1
11C	0,061	0,016	0,016	0,006	0,005	0,007	0,010	0,005	0,005	0,010	0,009	4
12A	0,054	0,015	0,016	0,008	0,008	0,002	0,003	0,004	0,004	0,015	0,018	1
12B	0,063	0,013	0,010	0,014	0,005	0,002	0,003	0,004	0,005	0,008	0,015	3
12C	0,056	0,007	0,006	0,006	0,004	0,001	0,003	0,005	0,006	0,011	0,012	3

Naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy, délky a množství mikrotrhlin byly následně na doporučení zadavatele práce pro snazší interpretaci výsledků zprůměrovány v rámci skupin (1 až 12). To znamená, že např. z hodnot tloušťky přetavené vrstvy vzorků 1A, 1B a 1C se vytvořil aritmetický průměr reprezentující průměrnou tloušťku přetavené vrstvy skupiny 1 (vzorky 1A, 1B a 1C byly vyrobeny za použití stejných parametrů, viz tab. 3.3). Přestože jsou vzorky v rámci skupiny vyrobené za stejných podmínek, jejich naměřené hodnoty se mírně liší. Rozdílnost či těsnost výsledků uvnitř skupiny 1 vystihuje obrázek 4.7, srovnávající naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy vzorků 1A, 1B a 1C. Z obrázku je patrné, že i přes rozdíly v konkrétních oblastech dodržuje tloušťka přetavené vrstvy všech tří vzorků společný trend.



Obrázek 4.7 – Porovnání velikosti přetavené vrstvy vzorků ze skupiny 1

Stejným způsobem byly zprůměrovány hodnoty týkající se mikrotrhlin a vznikla tabulka 4.2, ve které vystupují veličiny: průměrná tloušťka přetavené vrstvy (*avgPV*), průměrná nejdelší nalezená mikrotrhlina v základním materiálu (*avgLmax*) a průměrný počet mikrotrhlin (*avgN*).

*Tabulka 4.2 – Průměrné naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy a mikrotrhlin*

<i>Skupina</i>	<i>avgPV</i> (mm)	<i>avgLmax</i> (mm)	<i>avgN</i>
1	0,028	0,008	4,7
2	0,027	0,009	3,7
3	0,018	0,004	2
4	0,025	0,010	2
5	0,025	0,010	4,3
6	0,015	0,009	3,3
7	0,012	0,011	3,7
8	0,012	0,010	3,7
9	0,013	0,010	3,3
10	0,016	0,007	2,3
11	0,013	0,008	2
12	0,012	0,015	2,3

## 4.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

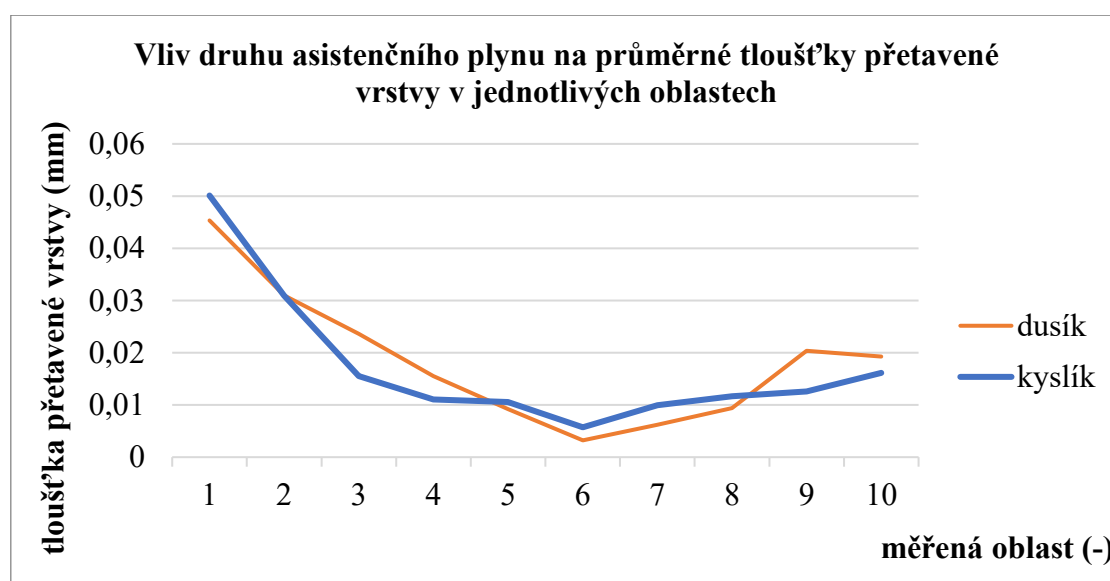
Jedním z cílů experimentu bylo objasnit vliv druhu asistenčního plynu (v tomto případě dusíku nebo kyslíku) na tloušťku přetavené vrstvy. Bylo očekáváno, že tloušťka přetavené vrstvy při použití kyslíku bude menší. Předpoklad autora vycházel z experimentu, jenž byl zmíněn na str. 25, kde bylo zjištěno, že použitím kyslíku se docílí menšího rozstříku v okolí otvoru. [23] Proti tomu zase hovoří zkušenosti nabyté při experimentu k bakalářské práci, ve které bylo zkoumáno laserové oxidační řezání a bylo pozorováno, že kyslík do procesu řezání kromě vrstvy oxidů na povrchu vnáší také hodně přidaného tepla z exotermické reakce železa s kyslíkem, které by teoreticky mohlo přetavenou vrstvu naopak zvětšovat [35].

K vyhodnocení byla použita tabulka porovnávání párů (tab. 4.3), ve které se porovnávají vždy dvě skupiny vzorků, které byly vyrobeny za stejných parametrů, ale s jiným asistenčním plynem. Skupina s větší průměrnou přetavenou vrstvou se pak v tabulce zaznačí symbolem „x“.

Tabulka 4.3 – Porovnání tloušťky přetavené vrstvy při použití kyslíku a dusíku

Porovnávané skupiny	Větší tloušťka PV (mm) je u:		Rozdíl ( $\mu\text{m}$ )
	$O_2$	$N_2$	
1 a 4	x		3
2 a 5	x		2
3 a 6	x		3
7 a 10		x	4
8 a 11		x	1
9 a 12	x		1

Dále byl vyhotoven graf, který srovnává průměrnou tloušťku přetavené vrstvy v jednotlivých oblastech všech vzorků vyrobených za použití dusíku a všech vzorků vyrobených za použití kyslíku (obrázek 4.8).



Obrázek 4.8 – Vliv druhu asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy

Výsledky z tabulky 4.3 lze interpretovat tak, že průměrná tloušťka přetavené vrstvy byla čtyřikrát ze šesti případů větší u skupin vzorků vyrobených pomocí kyslíku. Z tohoto pohledu by tedy měl být kyslík tím lepším asistenčním plynem, jenže v pravém sloupci, který udává, o kolik byla jedna hodnota větší než druhá, lze vidět, že jednotlivé rozdíly jsou minimální a zanedbatelné. To ostatně potvrzuje i obr. 4.8. Vzhledem k takto blízkým výsledkům tedy

výsledný verdikt zní, že druh asistenčního plynu nemá významný vliv na tloušťku přetavené vrstvy.

Obdobným způsobem byl vyhodnocován vliv druhu asistenčního plynu na vznik a délku mikrotrhlin. Byl vypočten průměrný počet a průměrná délka trhliny u všech vzorků vyrobených kyslíkem, respektive dusíkem. To přehledně prezentuje tabulka 4.4, která uvádí celkové průměrné tloušťky přetavené vrstvy (*avgPV*), průměrnou velikost nejdelší nalezené mikrotrhliny v základním materiálu (*avgLmax*) a průměrný počet mikrotrhlin (*avgN*) pro všechny vzorky vyrobené jednotlivými plyny. Průměrná délka trhliny byla 0,009 mm (kyslík) a 0,010 mm (dusík). Průměrný počet trhin byl 3,5 (kyslík) a 2,7 (dusík). Dá se tedy konstatovat, že průměrná délka i počet trhin jsou pro oba plyny srovnatelné.

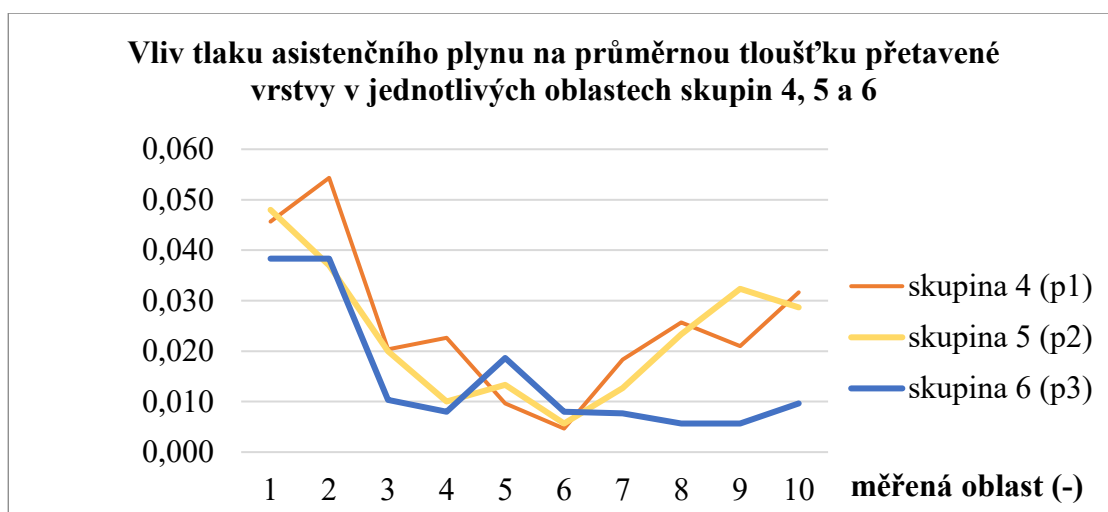
*Tabulka 4.4 – Vliv druhu asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy a mikrotrhliny*

	<i>avgPV (mm)</i>	<i>avgLmax (mm)</i>	<i>avgN (-)</i>
<i>Kyslík</i>	0,018	0,009	3,5
<i>Dusík</i>	0,018	0,010	2,7

Vliv tlaku asistenčního plynu byl vyhodnocován srovnáváním průměrných tlouštěk přetavených hodnot u skupin vyrobených jinak stejnými parametry. Vznikly tedy trojice skupin 1-2-3 (obr. 4.9) , 4-5-6 (obr. 4.10), 7-8-9 (obr. 4.11) a 10-11-12 (obr. 4.12). Intuitivně bylo očekáváno, že při použití dusíku způsobí vyšší tlak plynu svými dynamickými účinky nižší tloušťky přetavené vrstvy. Komplikovanější situace nastává při použití kyslíku, protože zvýšené množství dostupného kyslíku by mohlo být důležitým faktorem pro exotermickou reakci. Skupiny 1, 4, 7 a 10 byly vyrobeny za použití tlaku asistenčního plynu  $p_1 = 1$  bar, pro skupiny 2, 5, 8 a 11 byl použit tlak  $p_2 = 2$  bary a pro skupiny 3, 6, 9 a 12 byl použit tlak  $p_3 = 4$  bary.



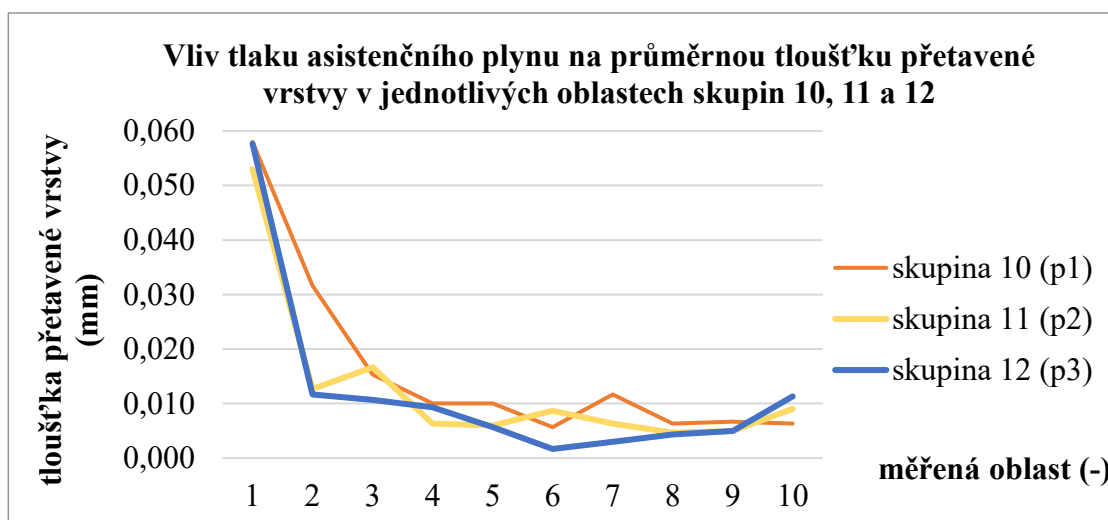
Obrázek 4.9 – Vliv tlaku asistenčního plynu – skupiny 1,2 a 3



Obrázek 4.10 – Vliv tlaku asistenčního plynu – skupiny 4, 5 a 6



Obrázek 4.116 – Vliv tlaku asistenčního plynu – skupiny 7, 8 a 9



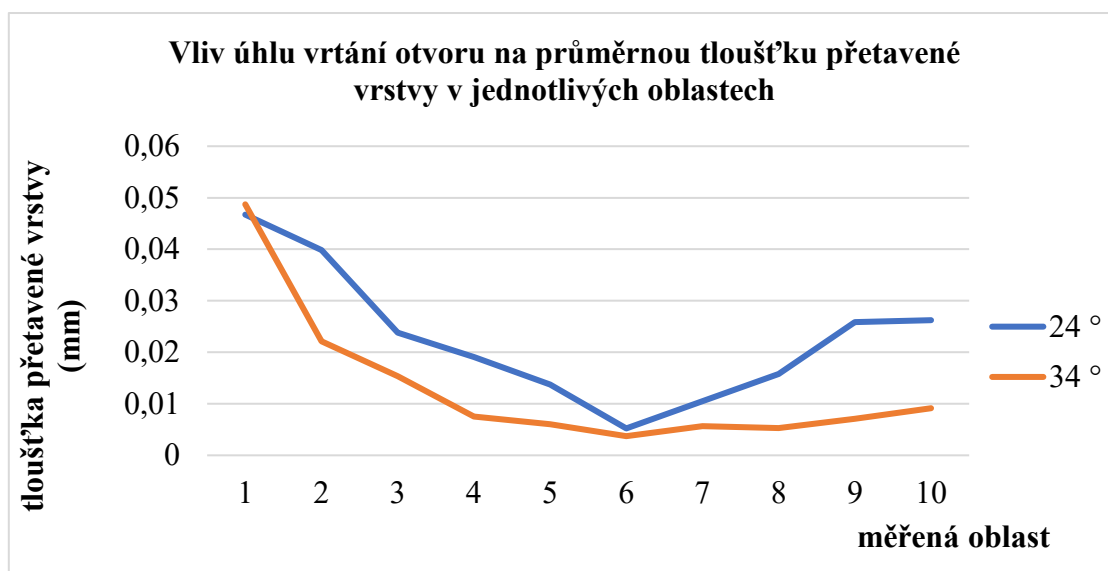
Obrázek 4.12 – Vliv tlaku asistenčního plynu – skupiny 10, 11 a 12

Z obrázků je patrné, že nejmenší přetavená vrstva vzniká za použití nejvyššího tlaku ( $p_3$ ). To ostatně potvrzuje také tabulka 4.5, která uvádí celkové průměrné tloušťky přetavené vrstvy ( $avgPV$ ), průměrnou velikost nejdelší nalezené mikrotrhliny v základním materiálu ( $avgLmax$ ) a průměrný počet mikrotrhlin ( $avgN$ ) pro všechny vzorky vyrobené jednotlivými tlaky. Hodnoty v tabulce dále ukazují, že tlak asistenčního plynu zřejmě nemá na délku mikrotrhlin žádný vliv. Hodnoty  $avgLmax$  jsou až překvapivě téměř stejné. Průměrný počet mikrotrhlin je sice nejnižší u  $p_3$ , ale podobně jako porovnávání vlivů kyslíku a dusíku jsou si čísla tak blízká, že pokud nějaký vliv existuje, tak není významný.

Tabulka 4.5 – Vliv tlaku asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy a mikrotrhliny

	$avgPV$ (mm)	$avgLmax$ (mm)	$avgN$ (-)
$p_1$	0,020	0,009	3,2
$p_2$	0,019	0,009	3,4
$p_3$	0,015	0,010	2,7

Posledním vyhodnocovaným faktorem na tvorbu přetavené vrstvy je úhel vrtání otvoru  $\alpha$ . Vzhledem k nízkému rozdílu úhlů ( $24^\circ$  a  $34^\circ$ ) nebyl předpokládán žádný větší vliv, avšak opak se ukázal být pravdou. Z naměřených hodnot jednoznačně vyplývá, že při  $\alpha = 34^\circ$  plechu vzniká tenčí přetavená vrstva, což dokazuje jak tabulka porovnávání párů (tab. 4.6), tak i graf průměrných tloušťek přetavené vrstvy v jednotlivých oblastech (obr. 4.14), ve kterém se porovnávají skupiny 1 až 6 ( $\alpha = 24^\circ$ ) se skupinami 7 až 12 ( $\alpha = 34^\circ$ ).



Obrázek 4.13 – Vliv úhlu vrtání otvoru

Tabulka 4.6 – Porovnání tloušťky přetavené vrstvy vzorků vrtaných pod různým úhlem

Porovnávané skupiny	Větší tloušťka PV (mm) je u:		Rozdíl ( $\mu\text{m}$ )
	Úhel vrtání 24 °	Úhel vrtání 34 °	
1 a 4	x		16
2 a 5	x		15
3 a 6	x		5
7 a 10	x		9
8 a 11	x		12
9 a 12	x		3

Vlivem menšího úhlu vrtání patrně dochází k větší kumulaci tepla a tvorbě tlustší přetavené vrstvy než u většího úhlu (viz obr. 4.13). Hodnoty rozdílů tloušťky přetavené vrstvy v tab. 4.6 už se nedají považovat za zanedbatelné. Celková průměrná přetavená vrstva vzorků s vyšším úhlem byla o 10  $\mu\text{m}$  tenčí.

Tabulka 4.7 opět obsahuje hodnoty celkové průměrné tloušťky přetavené vrstvy ( $avgPV$ ), průměrnou velikost nejdelší nalezené mikrotrhliny v základním materiálu ( $avgL_{max}$ ) a průměrný počet mikrotrhlin ( $avgN$ ) pro vzorky vyrobené pod různým úhlem  $\alpha$ . Bohužel, ani v tomto případě nebyl zjištěn zásadní faktor vzniku mikrotrhlin. Stejně jako u předešlých případů jsou si čísla týkající se trhlin velmi podobná.



Tabulka 4.7 – Vliv úhlu vrtání otvoru na tloušťku přetavené vrstvy a mikrotrhliny

	<i>avgPV (mm)</i>	<i>avgLmax (mm)</i>	<i>avgN (-)</i>
$\alpha = 24^\circ$	0,023	0,008	3,3
$\alpha = 34^\circ$	0,013	0,010	2,9

Bylo očekáváno, že tloušťka přetavené vrstvy má přímý vliv na vznik mikrotrhlin. Tabulka 4.8, která porovnává jednotlivé vzorky v rámci každé skupiny, ukazuje, že tomu tak není. Předpoklad byl, že u vzorku s největší průměrnou tloušťkou přetavené vrstvy (*avgPV*) bude nalezen největší počet trhlin (*N*) a případně i nejdelší naměřená trhlina (*Lmax*), například tak, jak je tomu ve skupině 1 (vzorky 1A, 1B, 1C v tabulce 4.8). Vzorky s největšími hodnotami parametrů *avgPV*, *Lmax* a *N* v rámci každé skupiny jsou v tabulce označeny symbolem „x“, případně symbolem „=“, pokud se hodnoty dvou vzorků rovnají.

Tabulka 4.8 – Korelace výskytu tloušťky přetavené vrstvy a mikrotrhlin

Největší hodnota naměřeného parametru:							
<i>Vzorek</i>	<i>avgPV (mm)</i>	<i>Lmax (mm)</i>	<i>N (-)</i>	<i>Vzorek</i>	<i>avgPV (mm)</i>	<i>Lmax (mm)</i>	<i>N (-)</i>
1A				7A			x
1B				7B			
1C	x	x	x	7C	x	x	
2A	x			8A			
2B				8B		x	
2C		x	x	8C	x		x
3A		=	x	9A	x	x	=
3B				9B			=
3C	x	=		9C			
4A			x	10A	x		x

Tabulka 4.8 – Korelace výskytu tloušťky přetavené vrstvy a mikrotrhlin – pokračování

Největší hodnota naměřeného parametru:							
<i>Vzorek</i>	<i>avgPV</i> (mm)	<i>Lma</i> <i>x</i> (mm)	<i>N</i> (-)	<i>Vzorek</i>	<i>avgPV</i> (mm)	<i>Lmax</i> (mm)	<i>N</i> (-)
4B	<i>x</i>			10B			
4C		<i>x</i>		10C		<i>x</i>	
5A	<i>x</i>	=		11A			
5B				11B			
5C		=	<i>x</i>	11C	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>
6A			<i>x</i>	12A	=	<i>x</i>	
6B	=	<i>x</i>		12B	=		=
6C	=			12C			=

## 5. Diskuze výsledků

Požadavky na laserem vrtané otvory ve firmě zadavatele udává interní norma PNCP52574. Z této normy mimo jiné vychází také metodika měření použitá při vypracování této diplomové práce. Norma je bohužel chráněna exportní licencí, a proto není možné ji zde přesně reprodukovat. Lze se tak řídit jen obecnými zásadami a požadavky firmy:

Maximální přípustná průměrná tloušťka přetavené vrstvy musí být v řádu desetin milimetru. Pro laserem obráběné rotační komponenty je tento požadavek přísnější, avšak myšlená součást (spalovací komora) se řadí mezi součásti nerotační. Tomuto kritériu vyhověly všechny zhotovené vzorky, přičemž největší průměrnou tloušťku přetavené vrstvy měl vzorek 4B s hodnotou 0,032 mm.

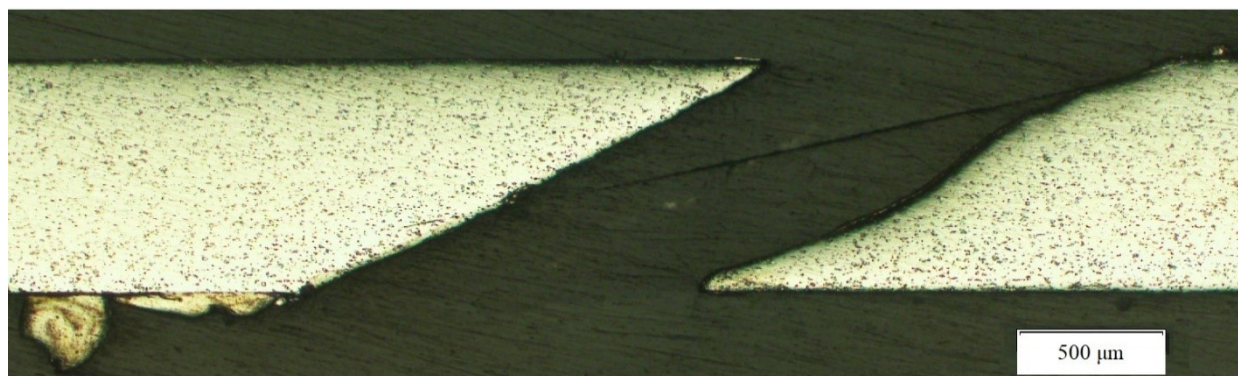
Maximální přípustná délka mikrotrhlin je v řádu setin milimetru. Největší naměřená délka mikrotrhliny byla zaznamenána u vzorku 12A s hodnotou 0,018 mm. Vzorky 1C, 2C, 4C, 5A, 5C, 6B, 7A, 7C, 8A, 8B, 9A, 12A, 12B a 12C měly délku nad 0,01 mm. Z licenčních důvodů zde není možné uvést konkrétní maximální přípustnou délku mikrotrhliny, ale lze říci, že žádná z mikrotrhlin neporušila požadavky dané normy.

Z naměřených délek a počtu mikrotrhlin je možno soudit, že mikrotrhliny jsou řízeny spíše jinými faktory než druhem či tlakem asistenčního plynu, například teplotním polem během vrtání, chemickým složením materiálu. Přestože bylo během metalografické zkoušky jasně vidět, že trhliny jsou iniciovány přetavenou vrstvou, která podle předchozích zkušeností zadavatele práce bývá velice tvrdá a křehká, nebyla zjištěna přímá závislost mezi tloušťkou přetavené vrstvy a počtem či délkou mikrotrhlin. Bylo pozorováno, že mikrotrhliny se šíří interkrystalicky.

Teorie, že by se asistenční plyn kvůli nízkému tlaku do otvoru během vrtání vůbec nedostal, nebyla vyvrácena ani potvrzena. Důkazem přítomnosti kyslíku v otvoru by mohla být oxidická vrstva na stěnách otvoru. Ta na vzorcích objevena nebyla, ale to je pravděpodobně zapříčiněno chemickým složením vrtaného materiálu, ve kterém je jen malý obsah železa (3 %) a nikl, kterého je ve slitině 57 % a který má ke kyslíku velmi malou afinitu. S ohledem na výsledky měření a další experimenty zkoumané v rámci literární rešerše je verdikt takový, že asistenční plyn se do vrtaného otvoru dostane, ale jeho vliv je zanedbatelný.

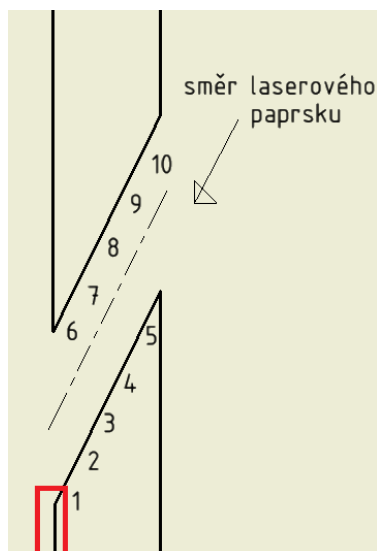
Při pohledu na tvar otvoru lze vidět, že jedna strana otvoru je relativně rovná, zatímco protější je silně zakřivená. Tento jev se nazývá tzv. „*barreling*“ neboli „*barreling effect*“,

což lze přeložit jako „soudkovatění“. Tímto termínem se označuje změna průměru otvoru v průběhu hloubky otvoru. To vzniká v důsledku kombinace dvou jevů: odrazu laserového paprsku od stěn otvoru a působení plazmy (plazmového oblaku), což způsobí lokální hromadění tepla. Intenzita „barrelingu“ závisí zejména na parametrech laserového paprsku, např. délce pulsu. „Barreling“ pak způsobuje odchylky velikosti průměru otvoru v řádech až setin milimetru [36]. „Barreling effect“ lze dobře pozorovat na vzorku 3A (obr. 5.1).



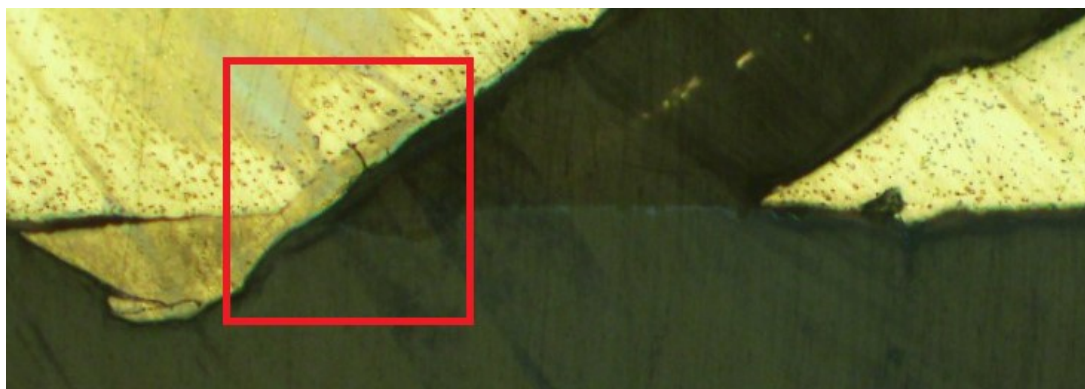
*Obrázek 5.1 – „Barreling effect“ na vzorku 3A*

Na obrázku 5.1 lze vidět, že na spodní hraně plechu zůstává přichycená struska. Tento jev byl společný pro všechny zhotovené vzorky a obecně se s ním potýkají všechny technologie laserového obrábění. Důvodem, proč se struska hromadí v této oblasti, je orientace vzorku při výrobě (viz obr. 4.1 a 5.2). Tato struska se pochopitelně nezapočítává do přetavené vrstvy, protože je vně otvoru, ale z grafů v kapitole 4 je patrné, že právě v oblasti 1 byla vždy tloušťka přetavené vrstvy největší. To je způsobeno tím, že tavenina, která se během procesu nestačila vypařit ani vyfouknout z otvoru, se hromadí právě v této oblasti.



*Obrázek 5.2 – Schéma orientace vzorku při výrobě s vyznačenou oblastí ulpívání strusky*

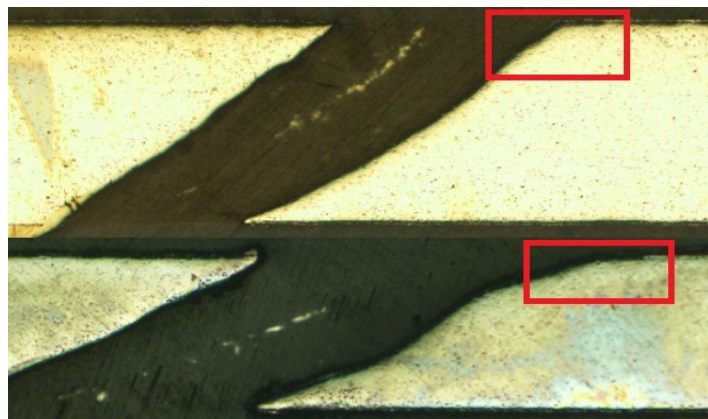
Tloušťka přetavené vrstvy v oblastech 1 a 2 byla obvykle několikrát větší než v jiných oblastech. Propojení strusky na spodní straně plechu s přetavenou vrstvou v oblasti 1 lze vidět na obrázku 5.3. Na snímku je zachycen vzorek 11C, jehož přetavená vrstva v oblasti 1 (vyznačené červeně) měla tloušťku 0,063 mm, zatímco jeho průměrná tloušťka přetavené vrstvy činila pouze 0,013 mm.



*Obrázek 5.3 – Detail vzorku 11C s červeně vyznačenou oblastí 1*

Úhel, pod kterým byly otvory vrtány, měl výrazný vliv na tloušťku přetavené vrstvy a také na geometrii otvoru v oblastech 9 a 10. Otvory vrtané pod úhlem  $24^\circ$  v těchto oblastech, kromě výrazně větší tloušťky přetavené vrstvy, vykazovaly silné zaoblení a velmi postupný přechod tvaru stěny otvoru do roviny plechu. Oproti tomu vzorky vrtané pod úhlem  $34^\circ$  měly v této oblasti relativně ostrý či jen mírně zaoblený roh. Rozdíl je možné vidět na obr. 5.4, na kterém jsou vybrány vzorky s vizuálně nejvíce (6A) a nejméně (12B) zaobleným rohem. Zaoblení rohu je způsobeno přílišným zahříváním povrchu plechu kolem otvoru. Tloušťka přetavené vrstvy

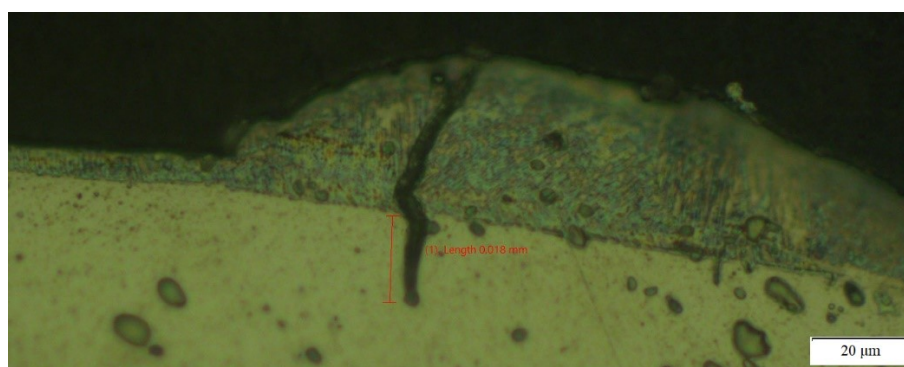
byla při použití úhlu  $\alpha = 34^\circ$  zpravidla nižší než při  $\alpha = 24^\circ$  a právě v oblastech 9 a 10 byly rozdíly největší. Také bylo pozorováno, že vzorky vrtané při větším úhlu vykazovaly mírně nižší sklony k „barreling effectu“.



*Obrázek 5.4 – Porovnání tvaru rohu (vyznačeno červeně) vzorků 12 B (nahore) a 6A (dole)*

Při zkoumání otvorů pod mikroskopem byl pozorován častý výskyt různých tvarových anomálií. V zásadě se jednalo o roztavený základní materiál, který znovu ztuhl na stěně otvoru. Typicky tyto anomálie tvořily dvě tvarově rozdílné formace:

- „Hrudky“, které byly charakteristické svým kopcovitým tvarem, způsobovaly lokální extrémní tloušťky přetavené vrstvy. Bylo pozorováno, že právě v těchto útvarech se často vyskytovaly mikrotrhliny. Největší nalezená mikrotrhlina v průběhu celého měření pocházela právě z tohoto útvaru (obr. 5.5).

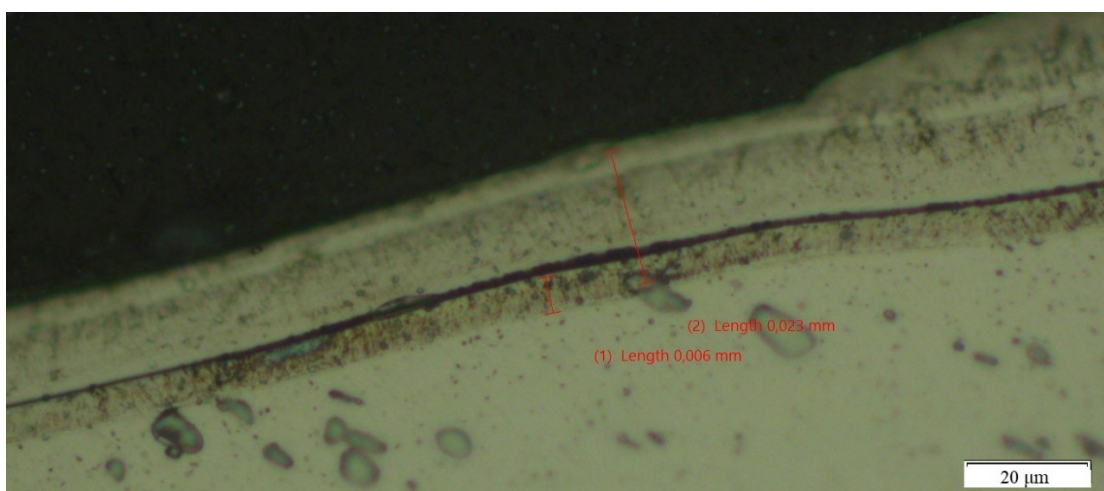


*Obrázek 5.5 – Detail „hrudky“ na vzorku 12 A s trhlinou o délce 0,018 mm*

- Druhou formací byly dlouhé pásy odchlípnuté přetavené vrstvy, které byly se základním materiálem spojeny jen na jednom či obou koncích. Nejčastěji se vyskytovaly v oblastech 7, 8 a 9. Jejich tloušťka byla spíše stálá a pohybovala se okolo 0,015 až 0,020 mm. Z hlediska jejich hodnocení byl zásadní



tvár a způsob spojení této vrstvy se základním materiálem. Pokud byl pás připojen k základnímu materiálu z obou stran a zároveň pokud nebyla tato mezera větší než určitá hodnota, tak se tato vrstva měření započítávala. Konce pásů byly zpravidla výrazně tlustší než středová část pásu a okolní přetavená vrstva. Pod těmito pásy odchlípnuté přetavené vrstvy byla pozorována jakási druhotná přetavená vrstva, typicky velmi tenká (v řádech jednotek mikrometrů) – viz obr. 5.6, kde je zachycena odchlípnutá i druhotná přetavená vrstva o tloušťkách 0,023 mm a 0,006 mm.



*Obrázek 5.6 – Detail pásu odchlípnuté přetavené vrstvy na vzorku 5B*

Kromě těchto dvou typů bylo pozorováno několik dalších tvarových anomálií, které se ale nevyskytovaly opakovaně. Některé z nich jsou uvedeny v příloze A.

Mechanismus vzniku anomálií není zcela jasný, ale z pohledu hodnocení kvality otvoru jsou tyto tvarové anomálie i „barreling effect“ normální a akceptovatelné. Z hlediska tvaru byly všechny otvory vyrobené v rámci tohoto experimentu hodnoceny jako velice dobré.

## 6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo posoudit vliv asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy při vrtání laserovým paprskem. Sledovanými parametry byl druh a tlak asistenčního plynu. Dále byl řešen i vliv úhlu, pod kterým byly otvory vrtány.

Vrtání laserovým paprskem je komplexní proces, během kterého probíhá mnoho dějů v krátkém časovém intervalu – tavení, vypařování, opětovné tuhnutí, proudění plynů a roztaveného kovu a v neposlední řadě také vznik plazmy. V teoretické části bylo řešeno rozdělení laserových zařízení a jejich využití v různých oblastech výroby. Obsah teoretické části byl volen v souvislosti s experimentem, a tak byl detailněji popsán zejména moderní typ laserů využívající optická vlákna a technologie vrtání laserem. Při popisu technologie vrtání laserem byl kladen důraz na čerpání informací ze zahraničních zdrojů a vědeckých experimentů. Poslední kapitola teoretické části byla věnována představení experimentu, tedy významu a funkci chladících otvorů spalovacích komor letadlových motorů, vlastnostem použitého materiálu a přehledem použitých strojů a zařízení.

Experimentální část simulovala laserové vrtání chladících otvorů do plechu z niklové slitiny Haynes 230, která se pro účely leteckého průmyslu v zadávající firmě běžně používá. Zkoumanými parametry byl druh asistenčního plynu (kyslík, dusík), tlak asistenčního plynu (1, 2 a 4 bary) a úhel, pod kterým byly otvory vrtány ( $24^\circ$  a  $34^\circ$  od roviny plechu). Primárním úkolem bylo vyhodnotit průměrnou tloušťku přetavené vrstvy, která po vyvrtání vznikla. Dále byly kontrolovány počty a maximální délky mikrotrhlin.

Pro tuto konkrétní aplikaci bylo zjištěno, že druh asistenčního plynu neměl na tloušťku přetavené vrstvy významný vliv, ale zvýšením tlaku asistenčního plynu se tloušťka průměrné přetavené vrstvy vrtaného otvoru snížila. Dále byl pozorován silný vliv úhlu vrtání. Při použití většího úhlu vrtání bylo dosaženo nižší tloušťky přetavené vrstvy, menší tendence k tzv. „barreling effectu“ a celkově lepší geometrie otvoru. Zejména zaoblení rohu bylo při použití vyššího úhlu vrtání mnohem menší (až téměř žádné). Z technologického hlediska tedy plyne jasné doporučení upřednostnit úhel vrtání  $34^\circ$  před úhlem  $24^\circ$ , avšak v této věci by asi měly mít hlavní slovo výsledky měření či simulací chladícího účinku těchto otvorů. Žádný ze zkoumaných parametrů neměl přesvědčivý vliv na počet či délku mikrotrhlin, a tak bylo konstatováno, že mikrotrhliny jsou řízeny spíše jinými parametry procesu, např. teplotním polem nebo chemickým složením materiálu. Přestože byly trhliny do základního materiálu zpravidla iniciovány v přetavené vrstvě, nebyla prokázána korelace mezi tloušťkou přetavené



vrstvy a počtem či maximální délkou mikrotrhlin. Mikrotrhliny byly interkrystalického charakteru. Největší naměřená mikrotrhlina měla délku 0,018 mm (vzorek 12A), a tak byly všechny vzorky z hlediska příslušné normy o maximální přípustné délce mikrotrhlin hodnoceny jako vyhovující. Výstupem tohoto experimentu je tedy doporučení v budoucnu vrtat s použitím tlaku asistenčního plynu 4 bary, upřednostnit úhel vrtání  $34^\circ$  a jako asistenční plyn použít ten levnější z testované dvojice.

Pro případné pokračování experimentu je doporučeno otestovat laserové vrtání dané slitiny pomocí stlačeného vzduchu jako asistenčního plynu, což by mohlo přinést finanční úsporu oproti použití kyslíku nebo dusíku. Dalším důležitým postřehem pro další experiment by bylo zvýšení počtu vzorků vyrobených jednotlivými parametry. Použití pouze tří vzorků vyrobených stejnými parametry (celem tedy 36 vzorků) v tomto experimentu bylo zvoleno na základě výrobních kapacit zadávající firmy, vytíženosti metalografické laboratoře a samotné pracnosti metalografické zkoušky. Zpětně se toto číslo ukázalo jako dostatečné, ale z hlediska statistiky by bylo vhodnější vyrábět 5 až 10 vzorků každé varianty. Porovnání naměřených hodnot tloušťky přetavené vrstvy vzorků vyrobených stejnými parametry je uvedeno v příloze B. Příští studie mikrotrhlin by se měla zaměřit spíše na termické a metalurgické změny při vrtání, například využitím programu pro numerické simulace.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BENKO, Bernard. Laserové technológie. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
- [2] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-010-1108-9.
- [3] PETERKA, Pavel, Pavel HONZÁTKO a Miroslav KARÁSEK. Vláknové lasery - jasné světlo ze skleněných nitek. *Československý časopis pro fyziku*. 2010, (4), 302-307 [cit. 2020-01-21]. ISSN 0009-0700.
- [4] ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser? *MM Průmyslové spektrum*. 2007, (3), 72 [cit. 2020-01-21]. ISSN 1212-2572. 070305.
- [5] LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. *Portál moderní fyziky* [online]. Společná laboratoř optiky FzÚ AV ČR a UP Olomouc, 13. 12. 2010 [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [6] MRŇA, Libor. Vláknové lasery pro průmyslové aplikace, už nikoli coby fyzikální rarita. *Technický týdeník*. Praha: SpringerMedia, 2009, roč. 57, č. 10. ISSN 0040-1064.
- [7] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU. *Lasery a optika* [online]. 19. 02. 2013 [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery--hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [8] PETERKA, Pavel a kol. Vláknové lasery: Vláknové lasery – součást výzkumného programu Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR. *Ústav fotoniky a elektroniky: Akademie věd ČR* [online]. [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: [https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/vlaknove\\_lasery.pdf](https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/vlaknove_lasery.pdf)

- [9] KASAP, Safa. PN junction devices and light emitting diodes. *Department of Physics and Astronomy* [online]. Canada: University of Saskatchewan, 2001 [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <http://www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/PNJunctionDevices.pdf>
- [10] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum*. 2012, (9), 126 [cit. 2020-01-21]. ISSN 1212-2572. 120911.
- [11] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
- [12] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl: Obrábění paprskem fotonů – laserem. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, 19.03., (3) [cit. 2020-01-15]. ISSN 1212-2572. 080304
- [13] MIČIETOVÁ, Anna, Ildikó MAŇKOVÁ a Karol VELÍŠEK. Top trendy v obrábění. V./VI. časť, Fyzikálne technológie obrábania. Žilina: Media/ST, 2007. Stroje, materiály, technológie. ISBN 978-80-968954-7-2.
- [14] ROSEN, D. W. a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing* [online]. New York: Springer, 2010 [cit. 2020-01-17]. ISBN 978-144-1911-193. Dostupné z: <https://book.cc/book/991171/b2be83>
- [15] KUBÁTOVÁ, Jitka a Ivo LUKEŠ. Laserové technologie opracování kovových materiálů. Dobrá u Frýdku-Místku: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1988. Hutnické aktuality (Výzkumný ústav hutnictví železa). ISSN 0322-8252.
- [16] ALZAYDI, Ammar. Trajectory generation and optimization for five-axis on-the-fly laser drilling: a state-of-the-art review. *Optical Engineering* [online]. 2018, **57**(12) [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1117/1.OE.57.12.120901. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-Engineering/volume-57/issue-12/120901/Trajectory-generation-and-optimization-for-five-axis-on-the-fly/10.1117/1.OE.57.12.120901.full#f2>

- [17] WEEDON, T. M. W. Pulsed Nd:YAG lasers in manufacturing applications. CRAFER, Roger a Peter OAKLEY. *Laser Processing in Manufacturing*. 1. Dordrecht: Springer Science+Business Media Dordrecht, 1993, s. 67-90. ISBN 978-94-010-4685-5.
- [18] LOW, D.K.Y, L LI a P.J BYRD. Spatter prevention during the laser drilling of selected aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **139**(1-3), 71-76 [cit. 2020-01-13]. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00184-5. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013603001845>
- [19] VERHOEVEN, Jan Cornelis Johannes. *Modelling laser percussion drilling* [online]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004 [cit. 2020-01-08]. ISBN 90-386-0942-6. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/1958778/200412856.pdf>
- [20] AL-SULTANY, Methaq Mutter Mehdi. Study of laser drilling mechanism parameters for a Ni-based superalloy. *Journal of Kerbala University* [online]. Kerbala: Kerbala University, 2009, **2009**(7), 346-363 [cit. 2020-01-06]. ISSN 18130410. Dostupné z: <https://www.iasj.net/iasj?func=article&aId=45338>
- [21] KAŠPAR, Jan. Laserové řezání: volba a vlastnosti asistenčních plynů. *Technik: měsíčník Hospodářských novin pro strojírenské inovace, technologie, výrobu a trh*. Praha: Economia, 2014, **1**(9), 50-51. ISSN 1210-616X.
- [22] LOW, D. K. Y., L. LI a A. G. CORFE. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy. *Applied Surface Science* [online]. 2000, (154-155), 689-695 [cit. 2020-01-13]. ISSN 0169-4332. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433299004274>
- [23] SCHNEIDER, Matthieu, Rémy FABBRO a Laurent BERTHE, et al., Parametric study of drilling with new innovative laser source: Application to percussion regime. In: *23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* [online]. Laser Institute of America, 2004, 2004, s. 540-548

- [cit. 2020-01-13]. DOI: 10.2351/1.5060384. ISBN 978-0-912035-77-2.  
Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.2351/1.5060384>
- [24] Složení atmosferického vzduchu. *Tzb-info* [online]. [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/74-slozeni-atmosferickeho-vzduchu>
- [25] HAN, Wei. *Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging* [online]. Worcester, 2004 [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0513104-155241/unrestricted/WHan.pdf>. Disertační práce. Worcester Polytechnic Institute.
- [26] GREPL, Martin. *Studium ovlivněných vrstev materiálu při obrábění leteckých superslitin laserem* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/110938>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Josef BRYCHTA
- [27] FUCHS, Fabian, aj., Challenges in designing very small jet engines - fuel distribution and atomization. In: *16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery* [online]. Honolulu, 2016 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: [http://isromac-isimet.univ-lille1.fr/upload\\_dir/finalpaper/402.finalpaper.pdf](http://isromac-isimet.univ-lille1.fr/upload_dir/finalpaper/402.finalpaper.pdf)
- [28] HUANG, Huan, Lih-Mei YANG a Jian LIU. Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser. *Optical Engineering* [online]. 2014, **53**(5) [cit. 2020-01-09]. DOI: 10.1117/1.OE.53.5.051513. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/optical-engineering/volume-53/issue-5/051513/Micro-hole-drilling-and-cutting-using-femtosecond-fiber-laser/10.1117/1.OE.53.5.051513.full>
- [29] HAYNES® 230® alloy. *Haynes International* [online]. 2019 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: <http://haynesintl.com/docs/default-source/pdfs/new-alloy-brochures/high-temperature-alloys/brochures/230-brochure.pdf>

- [30] Microstructure. *Haynes International* [online]. 2015 [cit. 2020-01-02]. Dostupné z: [https://www.haynesintl.com/alloys/alloy-portfolio/\\_High-temperature-Alloys/HAYNES-230-ALLOY/typical-microstructure.aspx](https://www.haynesintl.com/alloys/alloy-portfolio/_High-temperature-Alloys/HAYNES-230-ALLOY/typical-microstructure.aspx)
- [31] Delta Laser Machining System. *Winbro Group Technologies* [online]. 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.winbrogroup.com/files/DeltaFactSheetUKWebJan2019.pdf>
- [32] YLS-2000/20000-QCW. *GO Photonics* [online]. 2015 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.gophotonics.com/products/lasers/ipg-photonics/29-152-yls-2000-20000-qcw>
- [33] ZHANG, Chi, et al., Cooling effectiveness of effusion walls with deflection hole angles measured by infrared imaging. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2009, **29**(5-6), 966-972 [cit. 2020-02-27]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943110800224X>
- [34] LI, Weihong, et al., On the Flow Structures and Adiabatic Film Effectiveness for Simple and Compound Angle Hole With Varied Length-to-Diameter Ratio by Large Eddy Simulation and Pressure-Sensitive Paint Techniques. *Journal of Heat Transfer* [online]. 2017, **139**(12), 1-14 [cit. 2020-02-27]. DOI: 10.1115/1.4037085. ISSN 0022-1481. Dostupné z: <https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article/doi/10.1115/1.4037085/375555/On-the-Flow-Structures-and-Adiabatic-Film>
- [35] BARAN, Marek. *Řezání laserem*. Brno, 2017. 40s, 1 CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [36] Evaluation of laser drilling of holes in thermal barrier coated superalloys. *Materials Science and Technology* [online]. 2014, **30**(14), 1778-1782 [cit. 2020-05-06]. DOI: 10.1179/1743284713Y.00000000477. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743284713Y.00000000477>

## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

<i>Tabulka 1.1 – Základní přehled vybraných parametrů průmyslových laserů</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 3.1 – Chemické složení slitiny Haynes 230</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 3.2 – Mechanické vlastnosti slitiny Haynes 230 za zvýšených teplot</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 3.3 – Matice vyrobených vzorků</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 4.1 – Naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy, délky a množství mikrotrhlin</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 4.2 – Průměrné naměřené hodnoty tloušťky přetavené vrstvy a mikrotrhlin</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4.3 – Porovnání tloušťky přetavené vrstvy při použití kyslíku a dusíku</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 4.4 – Vliv druhu asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy a mikrotrhliny</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 4.5 – Vliv tlaku asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy a mikrotrhliny</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 4.6 – Porovnání tloušťky přetavené vrstvy vzorků vrtaných pod různým úhlem</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 4.7 – Vliv úhlu vrtání otvoru na tloušťku přetavené vrstvy a mikrotrhliny</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 4.8 – Korelace výskytu tloušťky přetavené vrstvy a mikrotrhlin</i>	<i>49</i>

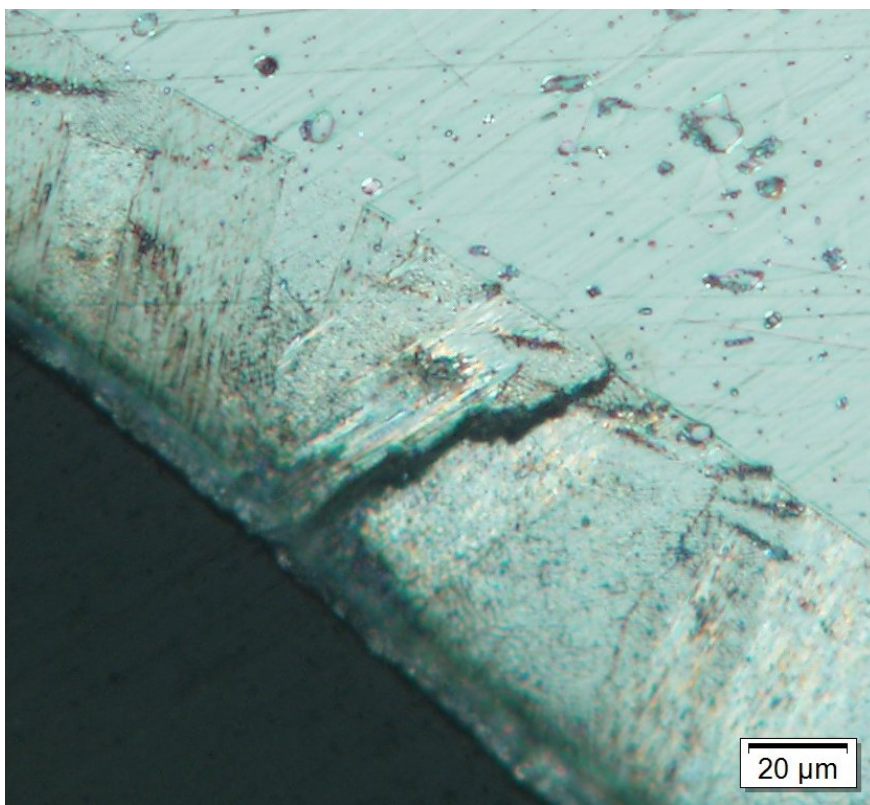
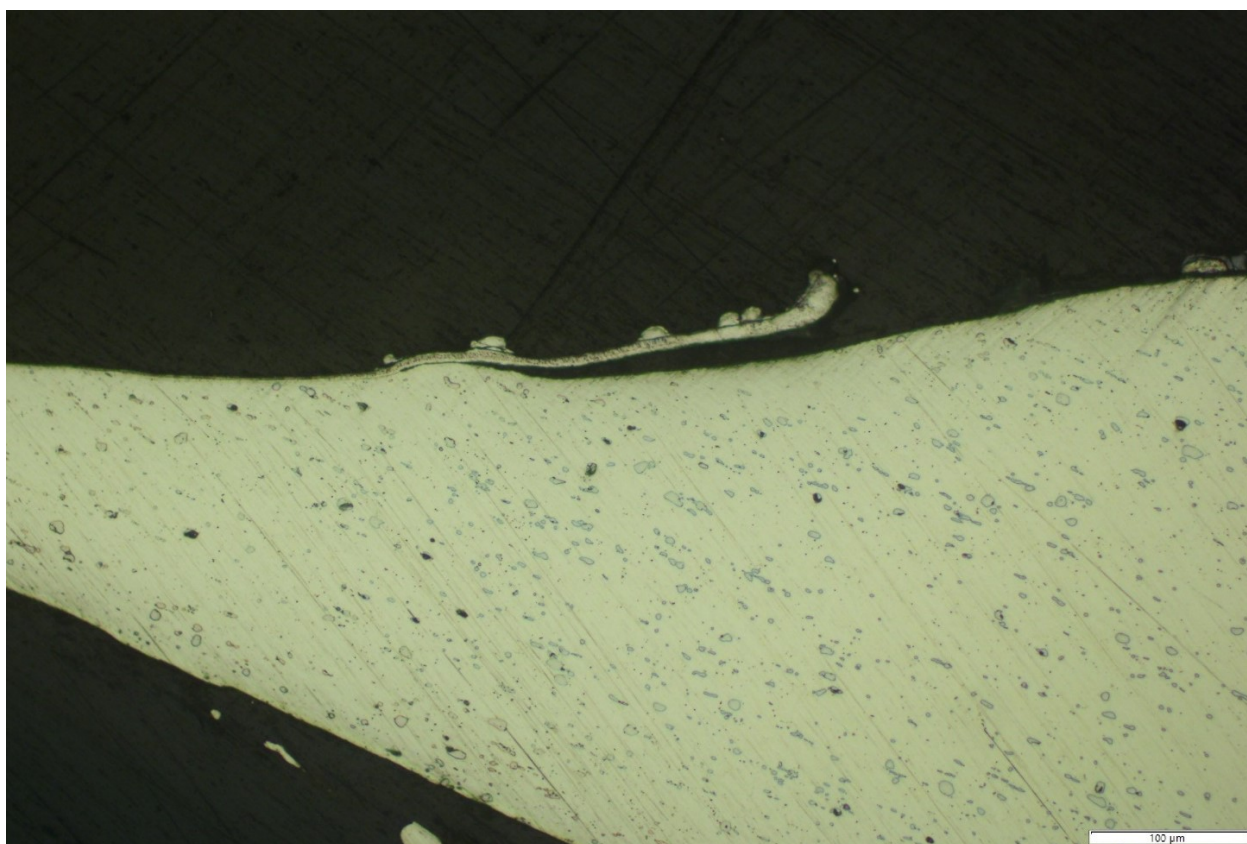
## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1 – Schéma optického vlákna</i>	14
<i>Obrázek 1.2 – Schéma vláknového laseru</i>	14
<i>Obrázek 1.3 – Příklady průřezů vláken vhodných pro čerpání přes plášť</i>	15
<i>Obrázek 1.4 – Energetický diagram PN přechodu</i>	16
<i>Obrázek 2.1 – Procentuální zastoupení jednotlivých laserových technologií</i>	18
<i>Obrázek 2.2 – Schéma soustružení laserem</i>	19
<i>Obrázek 2.3 – Schéma metody SLS</i>	21
<i>Obrázek 2.4 – Typický tvar vrtaného otvoru při ohnisku umístěném na povrch součásti</i>	22
<i>Obrázek 2.5 – Vrtání (a) jedním pulsem</i>	23
<i>Obrázek 2.6 – Ukázka perkusního vrtání průchozího otvoru pomocí 15 pulsů</i>	23
<i>Obrázek 2.7 – Schéma laserové hlavy</i>	25
<i>Obrázek 2.8 – Rozměry rozstříku okolo vrtaného otvoru</i>	26
<i>Obrázek 2.9 – Vliv tlaku asistenčního plynu na vrtaný otvor</i>	26
<i>Obrázek 2.10 – Model spalovací komory s chladicími otvory</i>	27
<i>Obrázek 2.11 – Schéma laserem vrtaného otvoru</i>	28
<i>Obrázek 3.1 – Schéma možné geometrie chladících otvorů</i>	30
<i>Obrázek 3.2 – Vliv úhlu natočení <math>\beta</math></i>	31
<i>Obrázek 3.3 – Typická mikrostruktura slitiny Haynes 230</i>	32
<i>Obrázek 3.4 – Obráběcí centrum Winbro Delta</i>	33
<i>Obrázek 3.5 – Zdroj YLS-2000/20000-QCW</i>	34
<i>Obrázek 4.1 – Vrtání otvoru</i>	37
<i>Obrázek 4.2 – Vyrobené vzorky</i>	38
<i>Obrázek 4.3 – Fotografie z přípravy metalografických vzorků</i>	39
<i>Obrázek 4.4 – Schéma měření vzorku</i>	39
<i>Obrázek 4.5 – Skutečný vzorek pod mikroskopem</i>	40
<i>Obrázek 4.6 – Mikrotrhlina procházející z přetavené vrstvy do základního materiálu</i>	40
<i>Obrázek 4.7 – Porovnání velikosti přetavené vrstvy vzorků ze skupiny 1</i>	42
<i>Obrázek 4.8 – Vliv druhu asistenčního plynu na tloušťku přetavené vrstvy</i>	44
<i>Obrázek 4.9 – Vliv tlaku – skupiny 1,2 a 3</i>	46
<i>Obrázek 4.10 – Vliv tlaku – skupiny 4, 5 a 6</i>	46
<i>Obrázek 4.11 – Vliv tlaku – skupiny 7, 8 a 9</i>	46
<i>Obrázek 4.12 – Vliv tlaku – skupiny 10, 11 a 12</i>	47

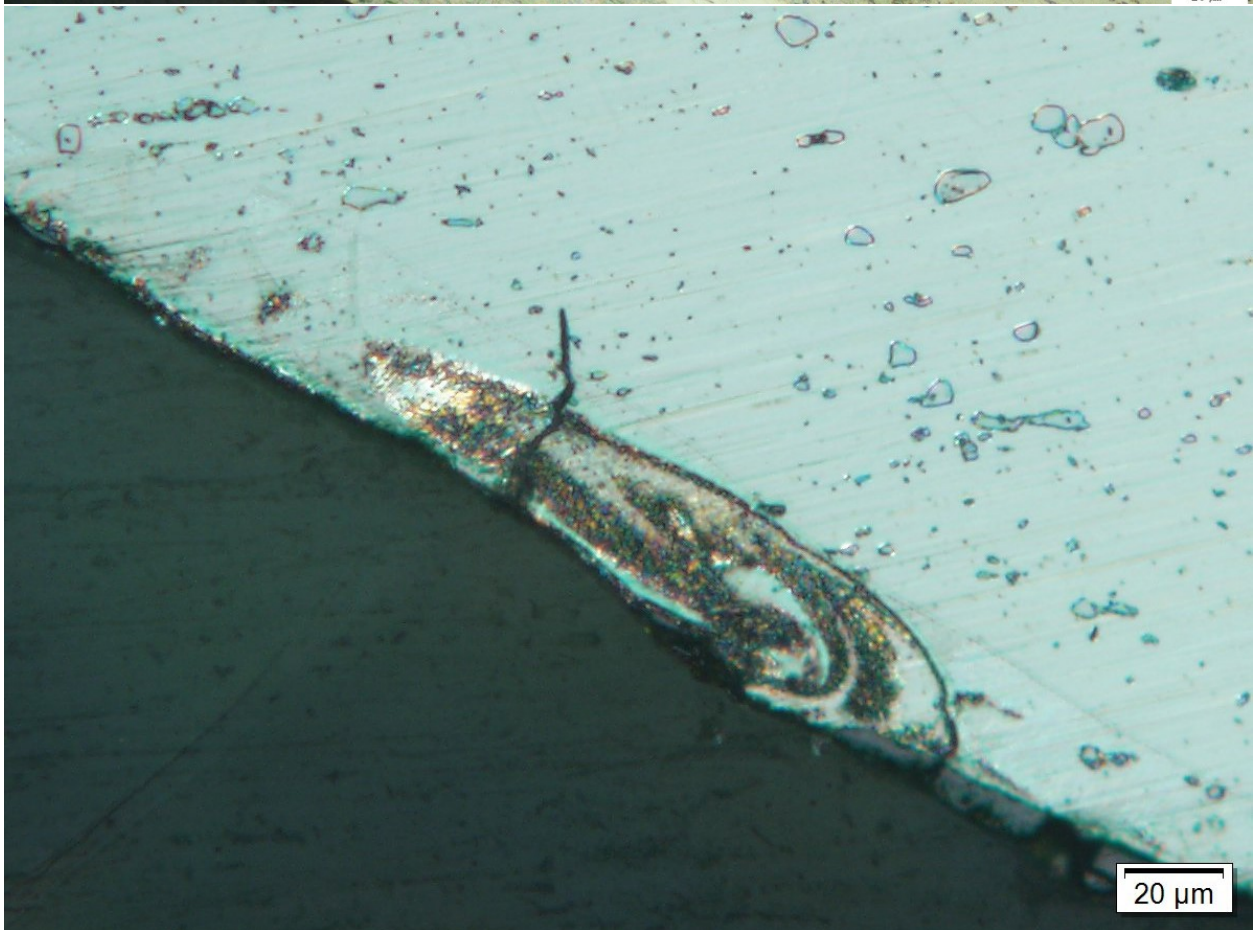
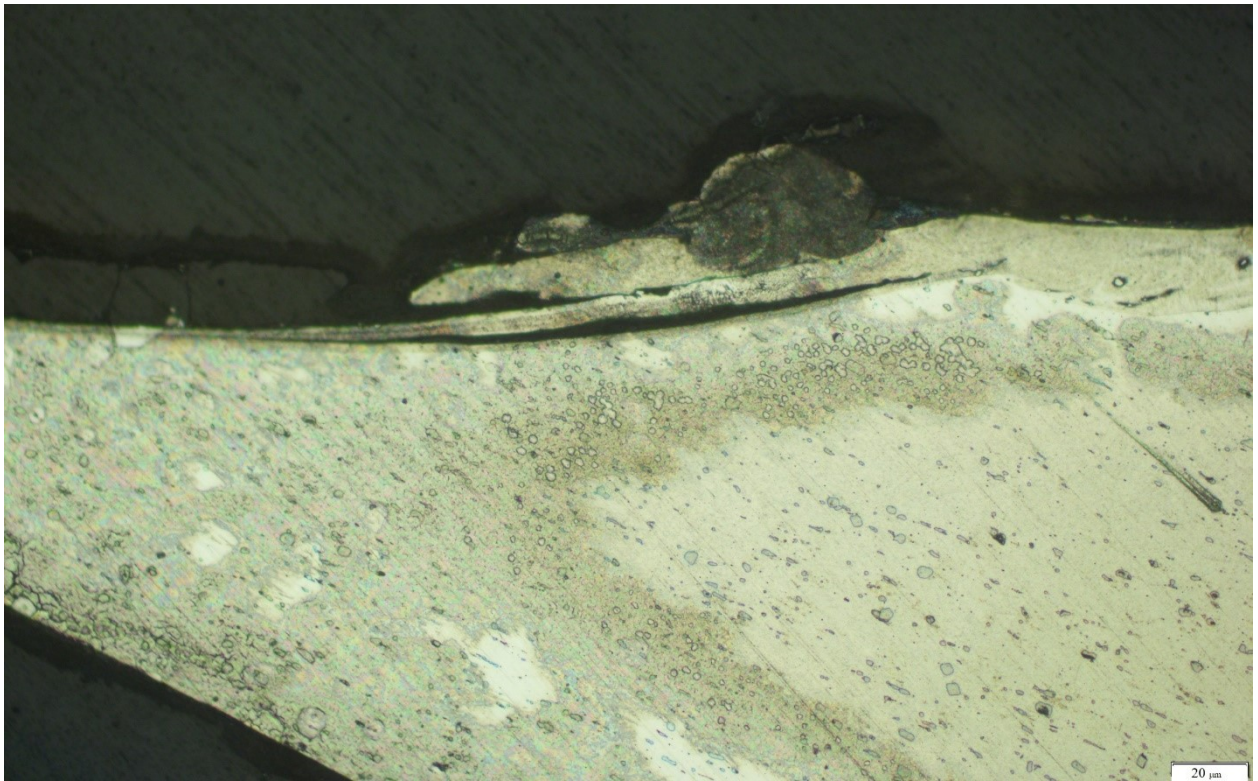


<i>Obrázek 4.13 – Vliv úhlu vrtání otvoru</i>	48
<i>Obrázek 5.1 – „Barreling effect“ na vzorku 3A</i>	52
<i>Obrázek 5.2 – Schéma orientace vzorku při výrobě s vyznačenou oblastí uplívání strusky</i>	52
<i>Obrázek 5.3 – Detail vzorku 11C s červeně vyznačenou oblastí 1</i>	53
<i>Obrázek 5.4 – Porovnání tvaru rohu (vyznačeno červeně) vzorků 12 B a 6A</i>	53
<i>Obrázek 5.5 – Detail „hrudky“ na vzorku 12 A s trhlinou o délce 0,018 mm</i>	54
<i>Obrázek 5.6 – Detail pásu odchlípnuté přetavené vrstvy na vzorku 5B</i>	55

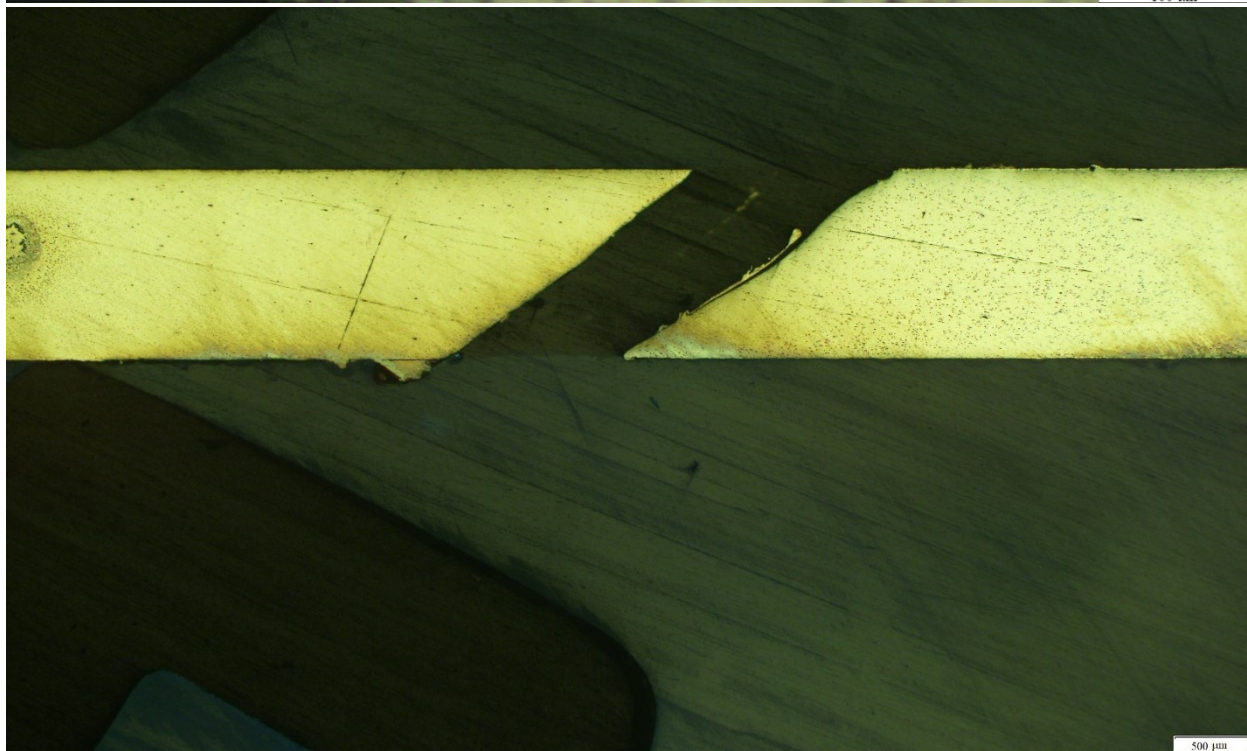
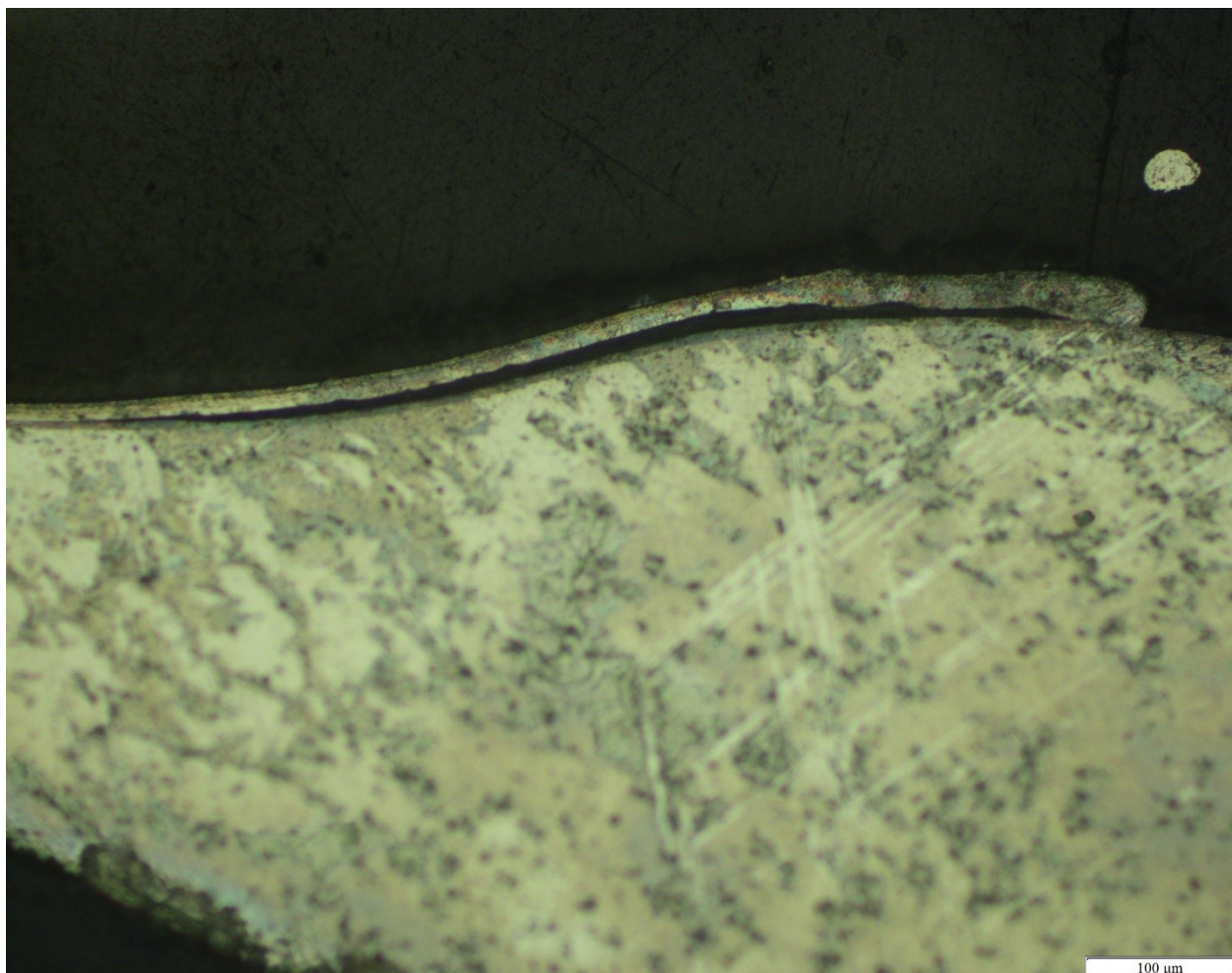
## PŘÍLOHA A – DALŠÍ SNÍMKY Z METALOGRAFICKÉ ZKOUŠKY











## PŘÍLOHA B – POROVNÁNÍ VZORKŮ V RÁMCI JEDNOTLIVÝCH SKUPIN

